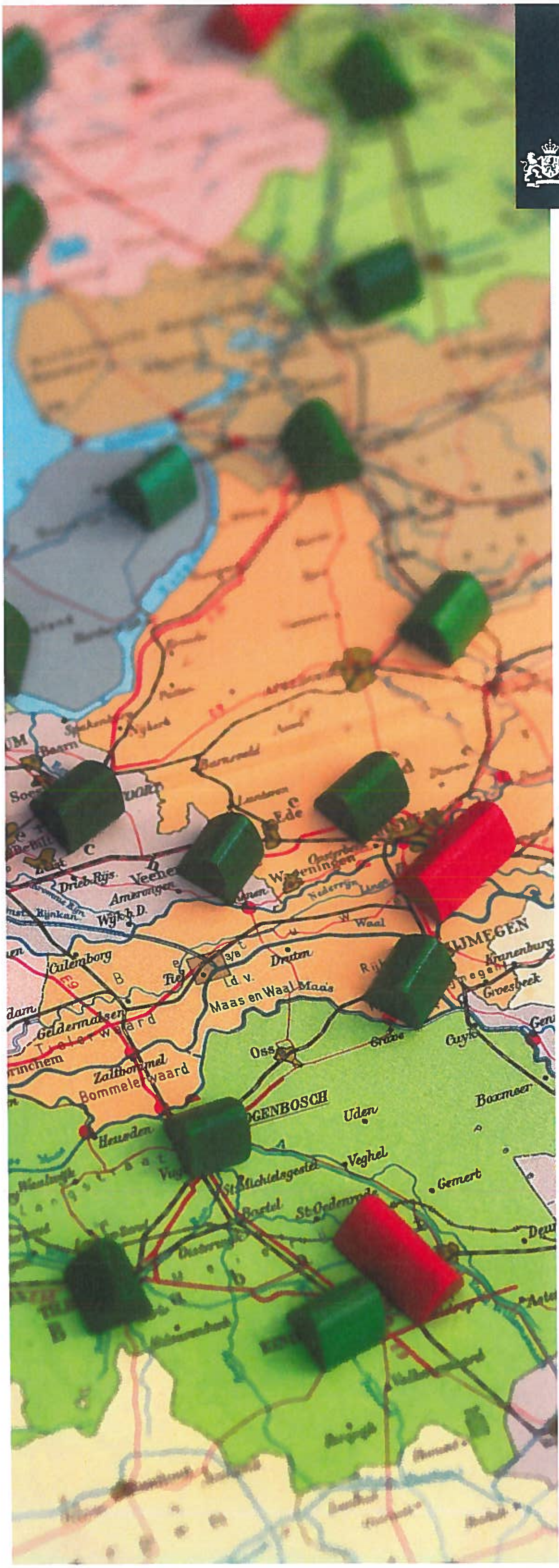


Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport

Radon en thoron in Nederlandse woningen *vanaf 1930*

Resultaten RIVM-meetcampagne 2013-2014

Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Radon en thoron in Nederlandse woningen vanaf 1930

Resultaten RIVM-meetcampagne 2013-2014

RIVM Rapport 2015-0087

Colofon

Ronald Smetsers, Centrum Veiligheid
Roelf Blaauboer, Centrum Veiligheid
Fieke Dekkers, Centrum Veiligheid
Martijn van der Schaaf, Centrum Veiligheid
Harry Slaper, Centrum Veiligheid

Contact:
R. Smetsers
Centrum Veiligheid
radon@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS), in het kader van het programma stralingsbescherming

Dit is een uitgave van:

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Radon en thoron in Nederlandse woningen vanaf 1930

In vrijwel alle Nederlandse woningen is de concentratie van zowel radon als thoron laag. Dat blijkt uit onderzoek naar radon en thoron dat het RIVM in 2013 en 2014 in ruim 2500 woningen in Nederland (bouwjaar 1930 en later) heeft uitgevoerd. Het is wereldwijd voor het eerst dat op deze schaal onderzoek is gedaan naar thoron in woningen. Radon en thoron zijn radioactieve edelgassen die van nature ontstaan in de bodem en in daarvan gemaakte bouwmaterialen. Vandaar uit kunnen ze in de woning terechtkomen. De radioactieve stoffen die ontstaan als radon en thoron vervallen, dragen bij aan het risico op longkanker.

Bij radon zien we regionale verschillen. Zo is de gemiddelde concentratie in Zuid-Limburg ongeveer tweeënhalf keer zo hoog als het landelijk gemiddelde. Dit heeft waarschijnlijk te maken met verschillen in bodemtype. Maar in vergelijking met andere Europese landen is de radonconcentratie in Nederlandse woningen laag. Verder zien we dat de gemiddelde radonconcentratie in woningen, gebouwd vanaf 2000, ruim twintig procent lager is dan het landelijk gemiddelde. Daarmee is aan de eerder gemaakte afspraken tussen overheid en bouwwereld, om de straling in nieuwbouwwoningen niet te laten toenemen, voldaan.

Voor thoron vallen de metingen lager uit dan verwacht. Er zijn enkele uitzonderingen, maar het aantal woningen met een meetwaarde aan de hoge kant is veel kleiner dan het RIVM op basis van een vooronderzoek uit 2012 had ingeschat. Voor thoron zijn nog geen normen of grenswaarden vastgesteld. En omdat dit het eerste grote thorononderzoek in de wereld is, is de onzekerheid in de meetresultaten groter dan bij radon het geval is. Dat maakt het interpreteren en beoordelen van de thoronmeetresultaten ingewikkeld. Ook is het precieze verband tussen de hoeveelheid thoron die vrijkomt uit pleistermaterialen, en de concentratie van vervalproducten van thoron in de woning nog niet duidelijk. Er is extra onderzoek nodig om dit beter uit te zoeken.

Van nature veranderen radon en thoron in radioactieve stoffen die zich aan zwevende stofdeeltjes in huis hechten. Na inademen blijven ze achter in de longen en geven daar straling af. Die straling draagt bij aan het risico op longkanker. Hoewel de hier gemeten concentraties radon en thoron in woningen internationaal gezien laag zijn, leidt het toch nog tot zo'n vierhonderd gevallen van longkanker per jaar in Nederland. Het betreft vooral rokers. Dat komt doordat het gezondheidsrisico van radon en thoron voor rokers gemiddeld 25 keer zo groot is als voor nooit-rokers. De nieuwe schatting van het aantal gevallen van longkanker per jaar door radon en thoron valt iets lager uit dan de vorige schatting uit 2000. Ook hebben we nu een beter beeld van de bijdrage door radon (ongeveer 70 procent) en door thoron (ongeveer 30 procent).

Kernwoorden: radon, thoron, straling, radioactiviteit, woningen, binnenmilieu, gezondheid, longkanker

Synopsis

Radon and thoron in Dutch dwellings built since 1930

Concentrations of radon and thoron progeny are low in virtually all Dutch dwellings, built since 1930. That is the outcome of a national survey, conducted by RIVM in approximately 2500 dwellings in the period 2013-2014. Radon and thoron are naturally occurring radioactive noble gasses, which are formed in soil and building materials. From there, part of it may reach the indoor environment. Inhalation of non-gaseous radioactive decay products of radon and thoron contributes to the induction of lung cancer.

The average concentration of radon in all dwellings equals 15,6 Bq/m^3. The 50th and 95th percentiles were found to be 12,2 and 37,9 Bq/m^3, respectively. In 0,4 per cent of the dwellings, values were found between 100 and 200 Bq/m^3. The average concentration of thoron progeny in all dwellings equals 0,64 Bq/m^3. The 50th and 95th percentiles are 0,53 and 1,37 Bq/m^3, respectively. A maximum value of 13,3 Bq/m^3 was recorded. Concentrations of both radon and thoron progeny were lower, on average, in dwellings built since the year 2000. We also noted a regional difference in radon concentrations, presumably due to differences in soil type. The highest regional average radon value, of approximately 40 Bq/m^3, was found in the most south-eastern part of the Netherlands.

In 75 dwellings, an additional measurement program was conducted to determine the relation between the exhalation of thoron from walls and the concentration of thoron progeny in the room. Thoron exhalation values exceeding ten times the median value of 0,022 Bq/m^2s (with a highest value of approximately 1 Bq/m^2s) were found rather frequently, but they seldom give rise to enhanced concentrations of thoron progeny. This may be explained by the fact that a thoron exhalation value from a specific spot on the wall does not represent the average exhalation of thoron from all wall surfaces in a room.

Based on these results, we estimate that indoor radon and thoron are responsible for about 400 cases of lung cancer per year in the Netherlands, with an uncertainty range of 100 to 800. Most of the casualties will be smokers, since smokers are much more susceptible to the risks of radon and thoron progeny. About 70 per cent of the risk can be attributed to radon, and 30 per cent to thoron.

This report is primarily written for the participants of this radon and thoron survey, as well as for other Dutch citizens. A scientific report (in English), aiming at the group of international researchers and policy makers, is scheduled for the end of 2015.

Keywords: radon, thoron, radiation, radioactivity, dwellings, indoor, health, lungcancer

Inhoudsopgave

Samenvatting

In een representatieve groep van circa 2500 woningen, gebouwd vanaf 1930, heeft het RIVM in de periode 2013-2014 de jaargemiddelde radonconcentratie en de jaargemiddelde concentratie van thoron-dochters bepaald. Ook hebben bewoners een vragenlijst ingevuld, zodat de meetresultaten gedifferentieerd kunnen worden naar het gedrag van de bewoners en de eigenschappen van de woning. Dit onderzoek geeft daarmee antwoord op vragen als: wat is de gemiddelde concentratie en wat is de verdeling van de jaargemiddelde radon- en thorondochter-concentratie in Nederlandse woningen, en zien we daarbij ook verschillen, bijvoorbeeld per bouwperiode of voor verschillende regio's in Nederland? Daarnaast heeft het RIVM in een aanvullende (niet noodzakelijkerwijs representatieve) groep van circa 75 woningen extra metingen uitgevoerd naar het verband tussen de thorondochter-concentratie in een ruimte en de mate waarin thoron uit de wand ontwijkt. Het is wereldwijd de eerste keer dat er een onderzoek op nationale schaal is uitgevoerd naar thoron in woningen.

Radon en thoron zijn radioactieve edelgassen die van nature ontstaan in de bodem en in daarvan gemaakte bouwmaterialen. Vandaar uit kunnen ze in de woning terechtkomen. De radioactieve stoffen die ontstaan als radon en thoron vervallen, dragen bij aan het risico op longkanker. Het is dus belangrijk dat we de blootstelling hieraan zo laag houden als redelijkerwijs mogelijk is. De overheid speelt hierbij een belangrijke rol, met onderzoek, wet- en regelgeving en voorlichting.

Dit onderzoek is uitgevoerd nadat in 2008 en later duidelijk was geworden dat in het verleden gebruikte radondetectoren niet alleen gevoelig waren voor radon, maar ook voor thoron. De oude meet-waarden zijn dus hoger dan de werkelijke radonconcentraties, maar de overschatting, die per meting verschillend is, kan achteraf niet meer gecorrigeerd worden. Ook zou thoron mogelijk een grotere rol spelen dan voorheen gedacht. Er was dus dringend behoefte aan een betrouw-baar en representatief beeld van radon en thoron in Nederlandse woningen. De opzet van dit onderzoek, de kwaliteit van de gebruikte detectoren en de resultaten van een voorlopige data-analyse zijn begin 2015 positief beoordeeld door een internationale commissie van deskundigen.

De over alle woningen gemiddelde radonconcentratie bedraagt 15,6 Bq/m^3. In de helft van de woningen is de radonconcentratie lager dan 12,2 Bq/m^3, en in 95 procent lager dan 37,9 Bq/m^3. In 0,4 procent van de huizen zijn waarden gevonden tussen 100 en 200 Bq/m^3. In eengezinswoningen is de radonconcentratie gemiddeld hoger dan in meergezinswoningen (flats, appartementen en dergelijke). In woningen vanaf 2000 is de gemiddelde radonconcentratie 22 procent lager dan de gemiddelde waarde over alle woningen sinds 1930. Aan de in 2004 gemaakte afspraak tussen overheid en bouwwereld om de blootstelling aan straling in nieuwbouwwoningen niet te laten toenemen, is wat radon betreft dus voldaan.

Verder zien we een plaatsafhankelijkheid die vooral gerelateerd lijkt aan de bodemsoort ter plaatse: in Noord- en West-Nederland is de gemiddelde radonconcentratie lager, en in het rivierengebied en Zuidoost-Nederland hoger. De hoogste regiogemiddelde waarde, van ongeveer 40 Bq/m^3, treffen we aan in Zuid-Limburg. Maar in vergelijking met andere Europese regio's, zoals delen van België, Frankrijk, Tsjechië, het Verenigd Koninkrijk en Zweden, is de radonconcentratie in Nederlandse woningen laag. Dit is in overeenstemming met de verwachting, gegeven de samenstelling van de Nederlandse bodem.

In dit onderzoek is een jaargemiddelde thorondochterconcentratie bepaald van ongeveer 0,64 Bq/m^3. In de helft van de woningen vinden we waarden lager dan 0,53 Bq/m^3 en in 95 procent van de woningen is de thorondochterconcentratie lager dan 1,37 Bq/m^3. Ongeveer 0,5 procent van de metingen is hoger dan 3 Bq/m^3. De hoogst gevonden waarde bedraagt 13,3 Bq/m^3. Bij de thorondochterconcentratie zien we geen verschil tussen eengezins- en meergezinswoningen. Ook de locatie is niet van invloed op de thorondochterconcentratie. Wel zien we verschillen tussen huizen uit deze en de vorige eeuw: de thorondochterconcentratie in woningen die vanaf 2000 zijn gebouwd, is gemiddeld ruim 15 procent lager dan de gemiddelde waarde over alle woningen.

In circa 75 woningen zijn 155 zogenoemde thoronexhalatiemetingen uitgevoerd die aangeven hoeveel thoron er ter plaatste uit de wand komt. Soms is gemeten in verschillende ruimtes, maar soms ook op meerdere plaatsen op één muur. In de helft van de gevallen was de thoronexhalatie lager dan 0,022 Bq/(m^{2}s). In ongeveer twee derde van alle exhalatiemetingen vinden we resultaten tot twee keer deze waarde. Maar bij ongeveer tien procent van de metingen vinden we waarden variërend van tien tot vijftig keer de mediane waarde. We vinden dus, net als in de pilotstudies, grote verschillen in de exhalatie van thoron uit in de praktijk toegepaste wandafwerkmaterialen. In deze woningen is ook gekeken naar de concentratie van thorondochters in de woonruimtes. De verdeling daarvan lijkt veel op de verdeling die we gevonden hebben in de representatieve groep van 2500 woningen. Dus ook hier treffen we enkele woningen aan met een iets hogere thorondochterconcentratie, maar vergeleken met het percentage hoge exhalatiemetingen is dat percentage woningen gering. Een hogere thoronexhalatiemeting hangt dus niet in alle gevallen samen met een hogere thorondochterconcentratie. Waarschijnlijk komt dat omdat de exhalatie van thoron op één bepaalde plek op de muur wordt bepaald, maar dat punt hoeft niet representatief te zijn voor het gehele oppervlak van de ruimte waar de thorondochterconcentratie gemeten is. Die concentratie is het resultaat van de exhalatie van alle oppervlakken in de ruimte.

Metingen zoals uitgevoerd in dit onderzoek hebben in de regel een tamelijk ruime onzekerheidsmarge, vooral ten gevolge van telstatistiek, maar bij metingen van de thorondochterconcentratie is die onzekerheid extra groot en voor een deel ook *systematisch*. Dat betekent dat alle resultaten uit dit onderzoek in werkelijkheid iets hoger zouden kunnen zijn dan gemeten, of juist iets lager. Deze systematische onzekerheid is het gevolg van de vertaalslag die we moeten maken van de meting van

het aantal neergeslagen atomen op de detector van één specifieke thorondochter naar de concentratie van alle thorondochters in de ruimte. De gegevens die we voor deze omrekening gebruiken, zijn bepaald in Japan. In theorie is het mogelijk dat de situatie in Nederland net iets anders is, zodat onze metingen óf een te hoge, óf een te lage inschatting geven van de werkelijkheid. Bij de interpretatie van de thoronresultaten van dit onderzoek moet men zich van deze onzekerheden bewust zijn.

Onderzoek naar de relatie tussen blootstelling aan radon of thoron en het optreden van gezondheidseffecten is complex. De getallen die het verband leggen tussen blootstelling en de kans op longkanker zijn nog onzeker en in de wetenschappelijke wereld is er nog veel discussie over dit onderwerp. Ondanks alle onzekerheden hebben we toch een inschatting gemaakt van de bijdrage van blootstelling aan radon- en thorondochters aan de kans op het krijgen van longkanker. Bij deze berekeningen is rekening gehouden met het feit dat voor rokers de risico's van blootstelling aan radon- en thorondochters veel groter zijn dan voor niet-rokers. We schatten dat in Nederland 3,5% van alle longkankergevallen komt door blootstelling aan radon en thoron. In een groep van 100.000 rokers gaat het dan om 350 personen die ooit in hun leven longkanker krijgen, en in een groep van 100.000 niet-rokers om 14 personen. Als mensen langdurig in een situatie verkeren waar de radon- of thorondochterconcentratie verhoogd is, dan is hun radon/thoronrisico, vergeleken met een normale blootstelling, ruwweg twee keer zo groot. Als maat voor 'een verhoogde concentratie' hebben we de waarden uit dit onderzoek gekozen, waarvoor geldt dat 95% van de woningen daaronder zit.

Als we deze resultaten toepassen op de gehele Nederlandse bevolking, dan volgt daaruit dat blootstelling aan radon- en thorondochters verantwoordelijk is voor ongeveer vierhonderd gevallen van longkanker per jaar (onzekerheidsmarge: honderd tot achthonderd). Dat betreft vooral rokers. We kunnen echter niet vaststellen wie deze mensen precies zijn. Zij zitten immers verborgen in de grote groep van bijna 12.000 gevallen aan longkanker per jaar in Nederland, die voornamelijk het gevolg zijn van (mee)roken. De nieuwe schatting van het aantal gevallen van longkanker per jaar door radon en thoron is iets lager dan de schatting van de Gezondheidsraad uit 2000. Ook hebben we nu een beter beeld van de bijdrage door radon (ongeveer 70 procent) en door thoron (ongeveer 30 procent).

1 Inleiding

1.1 Straling

In dit rapport hebben we het vaak over straling. We bedoelen dan altijd *ioniserende straling*, ook wel *radioactieve straling* genoemd[1]. Deze straling heeft zoveel energie dat het schade toe kan brengen aan biologische cellen. Maar voor het schrijfgemak korten we de term *ioniserende* of *radioactieve straling* af tot simpelweg *straling*.

Of we dat nu willen of niet, iedere dag staan we allemaal bloot aan straling. Voor een deel komt dat doordat straling van nature voorkomt. Daar kunnen we ons dus niet aan onttrekken. Maar we gebruiken het ook voor nuttige toepassingen, bijvoorbeeld in de geneeskunde. Denk daarbij aan röntgenfoto's, een CT-scan of radiotherapie voor iemand met kanker. Straling kan leiden tot ongewenste gezondheidseffecten. Het is dus belangrijk dat we de blootstelling aan straling zo laag houden als redelijkerwijs mogelijk is. De overheid speelt hierbij een belangrijke rol, met onderzoek, wet- en regelgeving en voorlichting.

Bij blootstelling aan straling denken veel mensen aan kerncentrales. Maar het aandeel straling dat we ontvangen door de nucleaire industrie is in werkelijkheid zeer gering. Een veel grotere bijdrage, zowel in Nederland als wereldwijd, komt door het inademen van radioactieve stoffen die van nature in onze omgeving aanwezig zijn. Het gaat dan vooral om de radioactieve elementen radon en thoron[2]. Over dit onderwerp gaat dit rapport. We geven hier antwoord op de vragen: hoeveel radon en thoron treffen we aan in Nederlandse woningen en wat betekent dat voor onze gezondheid?

1.2 Wat is er bekend uit eerder onderzoek?

Het eerste onderzoek naar de aanwezigheid van radon in Nederlandse woningen is begin jaren tachtig van de vorige eeuw uitgevoerd (Put, Veldhuizen et al. 1985). In dat onderzoek stond dat in woningen, gebouwd vanaf midden jaren zestig, de radonconcentratie hoger was naarmate de woning later gebouwd was. Vanwege deze stijgende trend is bij het vervolgonderzoek, begin jaren negentig, alleen gekeken naar nieuwbouwwoningen uit de periode na het eerste onderzoek. In dat tweede onderzoek werd de hogere waarde in nieuw-gebouwde huizen bevestigd (Stoop, Glastra et al. 1998).

Maar toen tien jaar later, met een ander type radondetector, weer een onderzoek werd uitgevoerd, ditmaal in nieuwbouwwoningen uit de periode 1994-2003, bleken de radonconcentraties ongeveer de helft te zijn van wat er voorheen gemeten was (Blaauboer, Dekkers et al. 2008, Bader, Dekkers et al. 2010). De waarschijnlijkste verklaring was dat de eerder gebruikte radondetectoren niet alleen gevoelig waren voor radon, maar ook voor een ander radioactief element dat van nature ontstaat,

[1] We hebben het hier dus niet over UV-straling, en ook niet over straling of elektromagnetische velden van bijvoorbeeld mobiele telefoons, zendmasten en hoogspanningslijnen.
[2] Eigenlijk gaat het om de vervalproducten (dochters) van radon en thoron. Dat wordt in hoofdstuk 2 uitgelegd.

namelijk thoron. Maar dat zou dan ook betekenen dat thoron een veel grotere rol speelt in Nederlandse woningen dan er voorheen was gedacht. In aanvullend onderzoek zijn deze vermoedens onderzocht en ook bevestigd (Blaauboer 2010, Blaauboer 2012).

Helaas konden de oude, foutieve radongegevens niet gecorrigeerd worden. Na het laatste onderzoek hadden we dus uitsluitend voor huizen uit de periode 1994-2003 de beschikking over betrouwbare radongegevens. En gegevens over thoron waren slechts bekend voor een tiental huizen waarin op kleine schaal een proefonderzoek was uitgevoerd (Blaauboer 2010, Blaauboer 2012). Het hoofddoel van het huidige onderzoek, waar dit rapport verslag van doet, was dan ook om te meten wat de jaargemiddelde concentratie bedraagt van radon en thoron[3] in Nederlandse woningen. We hebben daarvoor een omvangrijke groep woningen geselecteerd, die representatief is voor alle woningen in Nederland die gebouwd zijn vanaf 1930. Merk hierbij op dat het wereldwijd de eerste keer is dat er zo'n groot landelijk onderzoek wordt uitgevoerd naar thoron in woningen.

1.3 Wet- en regelgeving

Voor veel stralingsbronnen bestaat omvangrijke wet- en regelgeving om ons tegen de gevaren daarvan te beschermen, maar voor thoron en radon is dat niet of maar zeer beperkt het geval. Omdat radon en thoron van nature overal voorkomen, kun je de blootstelling hieraan maar gedeeltelijk beheersen. Ook het opstellen van grenzen is lastig.

Toch werd en wordt er wel degelijk geprobeerd om onnodig hoge blootstellingen aan radon en thoron te verminderen. In 2004 heeft de Nederlandse overheid afspraken gemaakt met de bouwwereld om de blootstelling aan straling in nieuwbouwwoningen niet te laten toenemen ('stand-still'). En de Europese Raad van Ministers heeft in december 2013 een richtlijn vastgesteld, waarin de lidstaten wordt opgedragen om een zogenaamd *nationaal referentieniveau voor radonconcentraties in woningen* vast te stellen. Nationale overheden moeten vervolgens acties ondernemen om radonconcentraties boven het nationaal referentieniveau zoveel mogelijk terug te brengen. De Europese lidstaten zijn vrij om zelf een nationaal referentieniveau te kiezen, maar het mag niet hoger zijn dan 300 Bq/m^3 (EU 2014). De Nederlandse overheid moet het Nederlandse referentieniveau uiterlijk in 2018 in de Nederlandse wetgeving vastleggen. De resultaten van dit onderzoek kunnen helpen om hierbij een verstandige keuze te maken.

Omdat de kennis over thoron nog achterloopt bij die over radon, beperkt de Europese richtlijn zich voor thoron tot algemene voorschriften.

1.4 Over dit rapport

Met dit rapport willen we de deelnemers aan het radon/thorononderzoek 2013-2014 en andere burgers informeren over de resultaten. Later in 2015 volgt er een Engelstalig wetenschappelijk rapport, dat zich vooral richt op de internationale beleids- en onderzoekswereld.

[3] In feite is de jaargemiddelde concentratie van thorondochters gemeten. Zie hoofdstuk 2 voor meer uitleg.

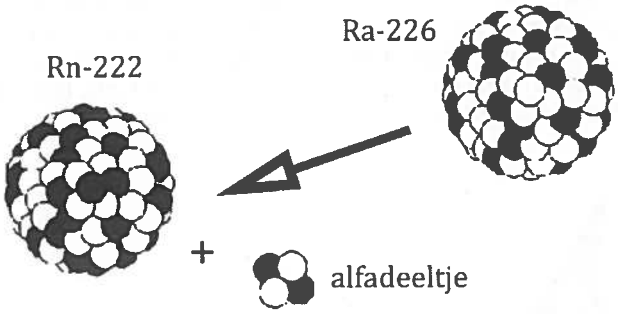
Dit rapport bestaat uit zeven hoofdstukken. Na de inleiding wordt in hoofdstuk 2 uitgelegd wat radon en thoron precies zijn en hoe die stoffen in huis komen. Hoofdstuk 3 behandelt de opzet van dit landelijke onderzoek, waarna de resultaten worden beschreven in hoofdstuk 4 (radon) en hoofdstuk 5 (thoron). In hoofdstuk 6 wordt de situatie in Nederland vergeleken met de ons omringende landen en wordt uitgelegd wat de gezondheidseffecten zijn. In hoofdstuk 7 trekken we conclusies en geven we aanbevelingen voor vervolgonderzoek.

2 Wat zijn radon en thoron en waar komen ze vandaan?

In alle woningen treffen we radon en thoron aan. Soms weinig en soms iets meer. Wat zijn dat precies voor stoffen, en waarom moeten we die goed in de gaten houden? Dat wordt in dit hoofdstuk verteld. Maar daarvoor is het nodig om eerst uit te leggen wat radioactiviteit is, en wat natuurlijke radioactieve reeksen zijn.

2.1 Radioactiviteit

Alle stoffen zijn opgebouwd uit atomen. Sommige atomen zijn niet stabiel en zullen vroeg of laat vervallen. Dat betekent dat onder uitzending van straling de samenstelling van de atoomkern verandert. Dit verschijnsel heet *radioactiviteit*. Het nieuwgevormde element noemen we het vervalproduct, maar het wordt ook wel de *dochter* genoemd. De radioactieve stof waaruit de dochter is ontstaan, is de *moeder* (zie Figuur 1).

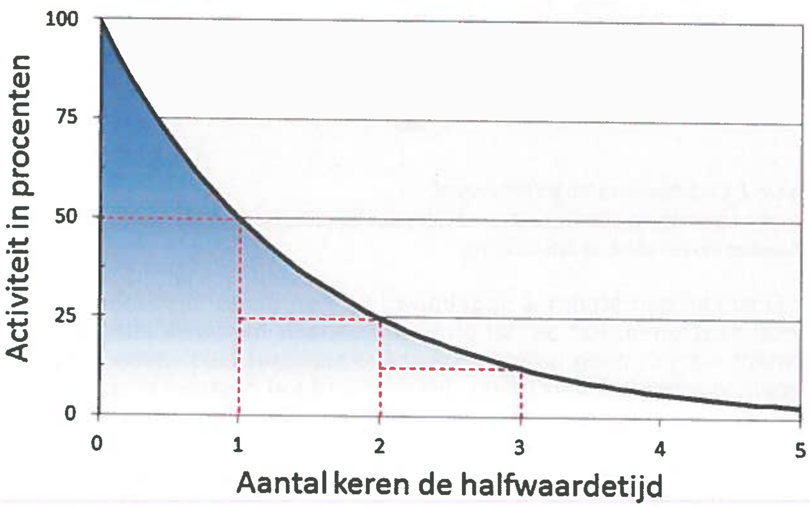


Figuur 1 Voorbeeld radioactief verval.
De radiumisotoop Ra-226 (moeder) vervalt naar de radonisotoop Rn-222 (dochter). Bij dit radioactief verval komt alfastraling vrij.

De kern van een atoom is opgebouwd uit een aantal protonen en een aantal neutronen. Het aantal protonen bepaalt met welk chemisch element we van doen hebben. Laten we als voorbeeld radon (Rn) nemen: dat heeft 86 protonen. Maar van radon bestaan er meerdere isotopen, dat wil zeggen atoomkernen met 86 protonen maar met een verschillend aantal neutronen. De som van het aantal protonen en het aantal neutronen wordt het massagetal genoemd. Isotopen zijn elementen met hetzelfde aantal protonen in de kern, maar een verschillend aantal neutronen, en dus een verschillend massagetal. Het massagetal gebruiken we voor de naamgeving van isotopen. De belangrijkste radonisotoop is radon-222, kortweg Rn-222. De naam radon houdt in dat het gaat om een element met 86 protonen. Het massagetal 222 geeft aan dat de kern daarnaast 222 - 86 = 136 neutronen bevat. Een ander veelvoorkomend radonisotoop is Rn-220. Dat heeft 2 neutronen minder dan Rn-222. Historisch hebben deze isotopen aparte namen gekregen: Rn-222 wordt simpelweg *radon* genoemd, en Rn-220 *thoron*. In paragraaf 2.3 wordt dit verder toegelicht.

Het aantal protonen bepaalt de *chemische* eigenschappen van een atoom, maar de combinatie van protonen en neutronen bepaalt de *radioactieve* eigenschappen van dat atoom. Rn-222 en Rn-220 gedragen zich chemisch op precies dezelfde manier: ze zijn allebei een edelgas en reageren dus niet met andere stoffen. Maar hun radioactieve eigenschappen zijn verschillend. Zo vervalt Rn-220 bijna 6.000 keer zo snel als Rn-222.

De *halfwaardetijd* geeft aan hoe snel (of langzaam) een radioactieve stof vervalt. Gedurende één halfwaardetijd vervalt de helft van de aanwezige radioactiviteit. Na twee keer de halfwaardetijd is dus nog één kwart van de oorspronkelijke hoeveelheid over (de 'helft van de helft'), en na vijf keer nog ongeveer 3% (zie Figuur 2). Halfwaardetijden van radioactieve stoffen kunnen variëren van fracties van een seconde tot vele miljarden jaren. Bijvoorbeeld: Polonium-212 (Po-212) heeft een halfwaardetijd van 0,0000003 seconde, maar de halfwaardetijd van uranium-238 (U-238) bedraagt maar liefst 4,5 miljard jaar. En nu we toch bezig zijn: de halfwaardetijd van Rn-222 is 3,8 dagen, en die van Rn-220 56 seconden. De hoeveelheid radioactiviteit wordt uitgedrukt in becquerel (Bq). Dat is het aantal atomen dat per seconde vervalt. Als we het hebben over een (radio)activiteitsconcentratie (bijvoorbeeld in lucht), dan wordt die uitgedrukt in becquerel per kubieke meter, ofwel Bq/m^3. Een activiteitsconcentratie van 1 Bq/m^3 in lucht betekent dat er in één kubieke meter lucht per seconde één atoom vervalt.



Figuur 2 Radioactiviteit en halfwaardetijd.
De activiteit van een radioactieve stof halveert na telkens één halfwaardetijd. Hoe groot die halfwaardetijd is, hangt af van de radioactieve stof waarmee je van doen hebt.

2.2 Natuurlijke reeksen

Al vanaf het ontstaan van de aarde, nu ongeveer 5 miljard jaar geleden, zitten er stoffen in de bodem die van nature radioactief zijn. Het gaat dan bijvoorbeeld om radioactieve isotopen van kalium (K-40), uranium (U-238) en thorium (Th-232). Alle drie hebben ze een halfwaardetijd

van meer dan een miljard jaar, dus ze zijn sinds het ontstaan van de aarde nog steeds niet helemaal vervallen.

Met U-238 en Th-232 is iets bijzonders aan de hand. Deze isotopen zijn namelijk het startpunt van een lange radioactieve reeks: de vervalproducten ('dochters') van U-238 en Th-232 zijn zelf ook weer radioactief, en de dochters daarvan ook weer, et cetera. Bij de uraniumreeks hebben we te maken met dertien radioactieve dochterproducten, totdat er uiteindelijk stabiel lood ontstaat. Binnen de thoriumreeks komen we elf radioactieve dochterproducten tegen.

Als we naar radioactiviteit in de bodem kijken, dan zien we daar dus vele tientallen verschillende radioactieve isotopen zitten. En die radioactieve stoffen zitten ook in materialen die voor een belangrijk deel uit bodembestanddelen bestaan. Denk bijvoorbeeld aan bouwmaterialen als beton, bakstenen, plavuizen en gips. Wel is het zo dat er in sommige bodemsoorten meer natuurlijke radioactiviteit zit dan in andere bodemsoorten, en zoiets geldt ook voor bouwmaterialen.

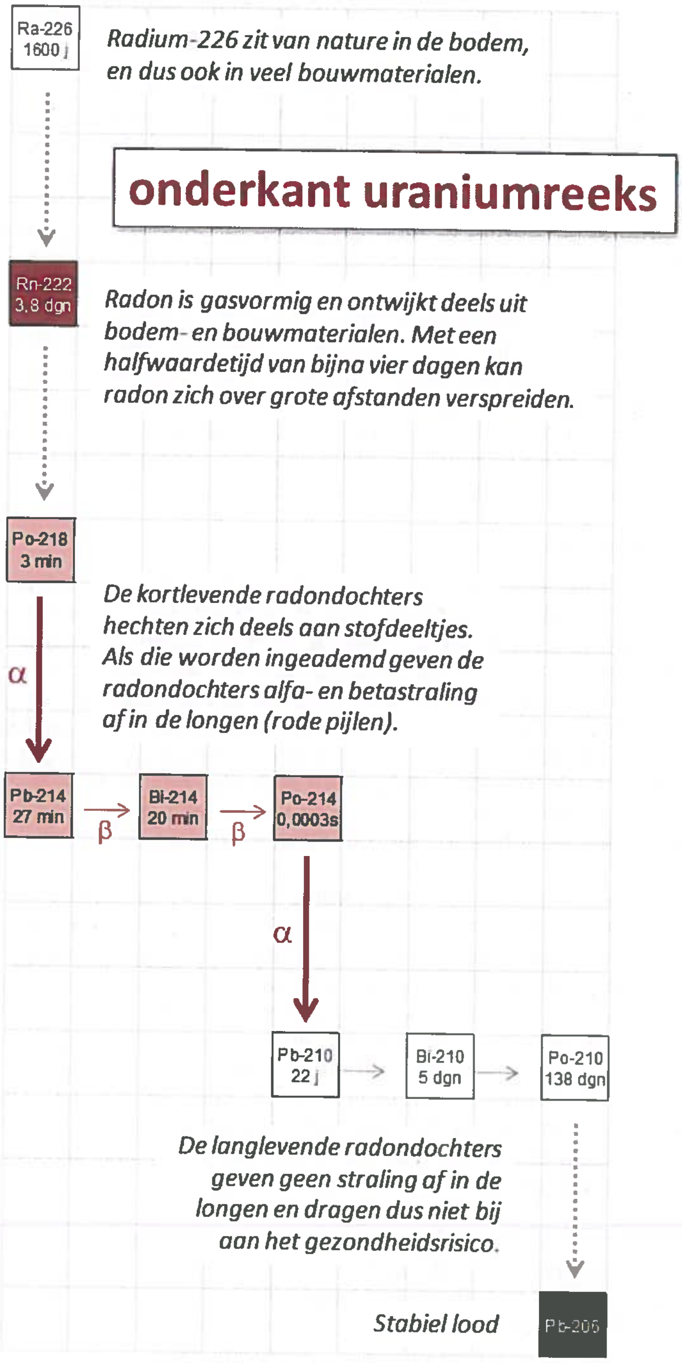
2.3 Radon en thoron

Zolang deze radioactieve stoffen in bodem- of bouwmaterialen blijven zitten, is er weinig aan de hand. Bij het radioactieve verval geven ze weliswaar straling af, maar de meeste straling wordt geabsorbeerd in het bodem- of bouwmateriaal. Maar er komen *wel* radioactieve stoffen vrij uit bodem- en bouwmaterialen. Ergens halverwege de uraniumreeks wordt er namelijk Rn-222 gevormd, een isotoop dat we meestal gewoon radon[4] noemen (zie Figuur 3). We hebben al eerder gezien dat radon een edelgas is. En doordat edelgassen zich niet aan andere stoffen binden, zal een deel van het gevormde radon uit het materiaal komen waarbinnen het is ontstaan. We noemen dat *exhalatie*.

Een deel van het gevormde radon komt dus in de lucht terecht. En die lucht ademen we in, dus er komt ook radon in onze longen. Dat is echter niet schadelijk, want we ademen het radon gewoon weer uit. Het is immers een edelgas. Maar radon vervalt zelf ook weer, en het dochterproduct, en ook de dochters daarvan, zijn *niet* gasvorming. Deze dochters slaan deels neer op wanden en voorwerpen, maar een groot deel hecht zich aan stofdeeltjes die in de lucht rondzweven. En stofdeeltjes die worden ingeademd, blijven vaak wél achter in de longen. De radondochters die daaraan vastzitten zullen in de longen verder vervallen, en de straling die daarbij vrijkomt, kan in de longen schade veroorzaken.

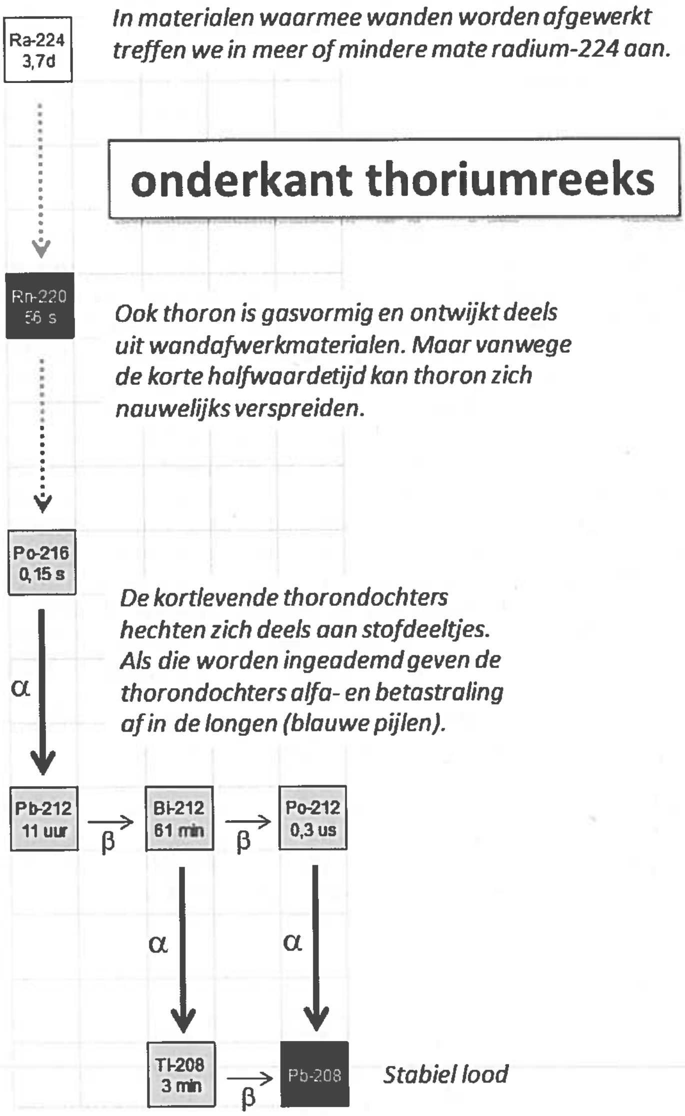
Bij de thoriumreeks zien we iets dergelijks (zie Figuur 4). Ergens halverwege ontstaat de isotoop Rn-220. Om gemakkelijk onderscheid te maken met Rn-222 wordt deze isotoop thoron[5] genoemd. Voor thoron geldt hetzelfde als voor radon: een deel zal vrijkomen, thoron zelf is niet schadelijk maar de dochters die we inademen wél.

[4] Rn-222 is ontstaan uit de radiumisotoop Ra-226. Radon betekent zoiets als: dochter van radium.
[5] Thoron betekent: dochter van thorium. In werkelijkheid is Rn-220 een achter-achter-kleindochter van Th-232. De moeder van Rn-220 is ook een radiumisotoop, namelijk Ra-224. Maar omdat de naam *radon* al was toebedeeld aan Rn-222, wordt Rn-220 sinds de ontdekking van deze isotoop *thoron* genoemd.



Figuur 3 Onderste gedeelte van de natuurlijke vervalreeks van uranium.
Vanuit radium-226 ontstaat het gasvormige radon (donkerrood). Kortlevende radondochters (lichtrood) kunnen worden ingeademd en geven vervolgens straling af in de longen. Vooral de alfastraling levert een gezondheidsrisico op.

Maar tussen radon en thoron zijn ook grote verschillen. En die zijn er omdat de halfwaardetijden van radon, thoron en hun respectievelijke dochters behoorlijk verschillend zijn. Laten we dat eens preciezer gaan bekijken.



Figuur 4 Onderste gedeelte van de natuurlijke vervalreeks van thorium.
In de thoriumreeks ontstaat ergens halverwege het gasvormige thoron (donkerblauw). Ook thorondochters (lichtblauw) leveren na inademing een gezondheidsrisico op.

Als radon ergens in een gesteente of bouwmateriaal ontstaat, dan zit het nog niet zomaar in de lucht. Daar zit een ingewikkeld proces tussen. Als het materiaal erg gesloten is, komt er nauwelijks radon vrij, ook al is het gasvormig. Maar veel bodem- en bouwmaterialen zijn min of meer poreus, en radongas kan dan via kleine openingen naar het oppervlak diffunderen, en uiteindelijk vrijkomen in de lucht. Met het begrip *exhalatietempo* geven we aan hoeveel radioactiviteit er per seconde uit een vierkante meter materiaal oppervlak komt. Het exhalatietempo hangt af van de hoeveel radioactiviteit die per seconde in het moedermateriaal gevormd wordt en het gemak waarmee het daaruit ontsnapt.

2.4 Buitenshuis

Radon dat eenmaal in de lucht zit, zal zich vrijuit verder verspreiden. Het is immers een edelgas: het slaat niet neer en het zal ook nergens mee reageren. We treffen radon dan ook overal aan, zowel buiten als binnen. Buitenshuis is de radonconcentratie in Nederland gewoonlijk erg laag: de buitenluchtconcentratie, gemiddeld over een jaar en over heel Nederland, bedraagt ongeveer 3 Bq/m^3. Die lage radonconcentratie buitenshuis komt door de bodemsoorten die we hier hebben en het feit dat Nederland aan zee ligt. In veel andere landen zit veel meer radon in de buitenlucht. Met het Nationaal Meetnet Radioactiviteit van het RIVM kunnen we de radonconcentratie buiten goed meten. Die is niet altijd en overal hetzelfde, maar wordt beïnvloed door de weersomstandigheden (windkracht, windrichting, neerslag, stabiliteit van de atmosfeer) en de eigenschappen van de omgeving (bodemsoort, vochtigheid bodem, mate van bebouwing en bestrating, ligging ten opzichte van de zee) (Smetsers and Blaauboer 1996, Blaauboer and Smetsers 1997). Zo loopt de radonconcentratie tijdens windstille nachten op leefniveau soms op tot tientallen keren de jaargemiddelde waarde. En in Zuid-Limburg meten we een jaargemiddelde radonconcentratie in de buitenlucht die met 5 Bq/m^3 iets hoger is dan in de rest van Nederland.

In de buitenlucht speelt thoron geen rol van betekenis. Dat komt door de korte halfwaardetijd van thoron van 56 seconden: de meeste thoronatomen die in de bodem ontstaan, vervallen nog in de bodem. En dat deel dat nog wel uit de bodem komt, vervalt vlak bij de grond, waarna veel dochters zich hechten aan het bodemoppervlak.

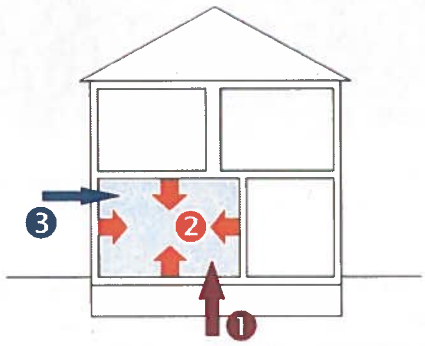
2.5 Binnenshuis

Radon dat vanuit de bodem in de buitenlucht terechtkomt, zal zich doorgaans over een enorm volume verspreiden. Daarom is de radonconcentratie buiten relatief laag. Maar binnenshuis zit het radon veel meer opgesloten, en meten we dus hogere concentraties. Iets dergelijks geldt ook voor de thorondochters. In de volgende hoofdstukken leggen we uit wat we precies gemeten hebben in dit radon/thorononderzoek en wat daarvan de resultaten zijn. Om dat goed te kunnen begrijpen, beschrijven we eerst de processen die bepalend zijn voor de concentraties van radon, thoron en hun dochterproducten in woningen. Vanwege de verschillen tussen radon en thoron doen we dat apart.

2.5.1 *De concentratie van radon en radondochters in woningen*

Radon kan op veel manieren in huis terechtkomen (zie Figuur 5). De belangrijkste zijn:

1. Een deel van het radon dat ontstaat in de bodem onder het huis komt (vaak via de kruipruimte) in de woning.
2. Een deel van het radon dat ontstaat in de bouwmaterialen van het huis komt vrij in de woning.
3. Door ventilatie komt radon van buiten naar binnen (en andersom).



Figuur 5 De herkomst van radon in woningen.
Radon kan op verschillende manieren in de woning komen: (1) via de kruipruimte, (2) door exhalatie uit bouwmaterialen en (3) van buiten.

Het hangt van de situatie af welk pad het belangrijkst is. Van huizen uit de periode 1994-2003, met doorgaans een bouwconstructie van beton, weten we dat ongeveer 70% van het radon afkomstig is uit bouwmaterialen (Blaauboer, Dekkers et al. 2008, Bader, Dekkers et al. 2010). In dat soort nieuwbouwhuizen is veel steenachtig bouwmateriaal aanwezig, maar is de kruipruimte vaak goed afgedicht. In veel oude huizen, met een bouwconstructie van hout, speelt radon vanuit de bodem waarschijnlijk een belangrijkere rol, maar dat is in Nederland nooit goed onderzocht. Verder is voor de radonconcentratie in de woning ook de leefstijl van de bewoners van belang. Het gaat dan om zaken als: wordt er gerookt, is er een open haard, hoe wordt er geventileerd en hoe sterk wordt het huis verwarmd[6]?

Daarnaast kan er sprake zijn van een bijzondere situatie waarbij bewoners, vaak zonder dat ze dat weten, voorwerpen in huis hebben waaruit veel radon vrijkomt. Je moet dan denken aan verzamelingen van minerale stenen of antieke voorwerpen waar radiumverf gebruikt is om bijvoorbeeld wijzers en cijfers op wijzerplaten op te laten lichten (zie Figuur 6).

Tot nu toe hebben we het steeds over radon, maar zoals eerder gezegd, zijn het de radon*dochters* die een gezondheidsrisico vormen. Hoe is nu het verband tussen radon en radondochters in de woning?

[6] Als een huis sterk verwarmd wordt, en de kruipruimte niet goed is afgedicht, dan stroomt er vanwege het zogenaamde schoorsteeneffect meer radon via de kruipruimte het huis in. Dat effect is vooral sterk in landen met een rotsachtige bodem, koude winters en huizen waarvan de kruipruimte in verbinding staat met de rest van de woning. Dat geldt bijvoorbeeld voor een land als Zweden.





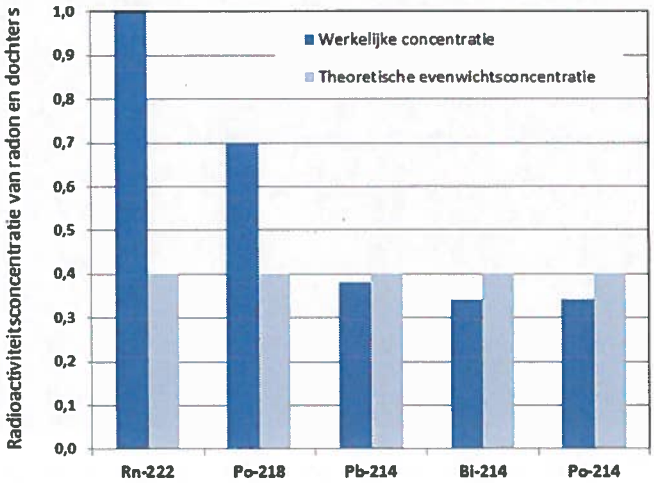
Figuur 6 Twee voorbeelden van oude radioactieve uurwerken.
Op de wijzerplaat en de wijzers van deze exemplaren is radiumverf aangebracht waaruit continu radon ontsnapt.

Als radon vervalt, ontstaat er een radioactief poloniumisotoop (Po-218), met een halfwaardetijd van 3 minuten (zie Figuur 3). Als dat vervalt ontstaat er een loodisotoop (Pb-214, 27 min), vervolgens een bismuth-isotoop (Bi-214, 20 min) en tenslotte een ander poloniumisotoop dat vrijwel meteen vervalt (Po-214, 0,0003 sec). De loodisotoop die dan ontstaat (Pb-210, 22 jaar) heeft zo'n lange halveringstijd dat we daar binnenshuis geen last meer van hebben.

Als de vervalproducten van radon ook edelgassen zouden zijn, dan zouden de radioactiviteitsconcentraties van die stoffen in de lucht hetzelfde zijn als die van radon. Maar polonium, lood en bismuth zijn vaste stoffen. Zo gauw die in de lucht ontstaan, zullen ze zich ergens aan hechten. Dat kan de wand zijn of een willekeurig ander voorwerp. In dat geval dragen ze niet meer bij aan de concentratie in de lucht. Maar de kans is groter dat ze aan een van de vele miljoenen stofdeeltjes blijven plakken die binnenshuis rondzweven. Zolang deze deeltjes in huis rondzweven, dragen de daaraan vastzittende radondochters bij aan de luchtconcentratie. Maar ook stofdeeltjes hechten zich uiteindelijk aan wanden en voorwerpen. Op die manier verdwijnen er dus ook radondochters uit de lucht. Met andere woorden: de concentraties van dochterproducten van radon in lucht zullen altijd kleiner zijn dan die van radon zelf. Bovendien wordt de concentratie van een dochter lager naarmate die dochter in de vervalreeks verder van radon af zit. Dat is schematisch getekend in Figuur 7 (de donkerblauwe balken).

Met vijf verschillende concentraties is het niet handig om de schadelijkheid van de radioactiviteit in lucht aan te duiden. Om die reden is de zogenaamde evenwichtsconcentratie gedefinieerd: dat is het (theoretische) mengsel van radon en dochters, met allemaal dezelfde radioactiviteitsconcentratie, dat evenveel stralingsschade oplevert als het werkelijke mengsel. In Figuur 7 is de evenwichtsconcentratie weergegeven met de lichtblauwe balken. Deze evenwichtsconcentratie is een rechtstreekse maat voor de gezondheidsschade. We weten, na tientallen jaren van onderzoek, dat de evenwichtsconcentratie binnenshuis ruwweg gelijk is aan 40% van de radonconcentratie.

Als we radon meten, kunnen we de evenwichtsconcentratie dus gemakkelijk schatten. Stel, we meten binnenshuis een jaargemiddelde radonconcentratie van 20 Bq/m^3, dan is de evenwichtsconcentratie van radondochters die daarbij hoort ongeveer 0,4 x 20 = 8 Bq/m^3.



Figuur 7 Voorbeeld van de radioactiviteitsconcentratie in lucht van de kortlevende radondochters, ten opzichte van radon zelf.
In donkerblauw zijn de werkelijke concentraties weergegeven, en in lichtblauw de theoretische evenwichtsconcentratie die evenveel stralingsschade oplevert als het echte mengsel.

2.5.2 *De concentratie van thoron en thorondochters in woningen*

De situatie rond radon en radondochters binnenshuis is al behoorlijk complex, maar die van thoron en thorondochters is nóg ingewikkelder. Daar komt bij dat er wereldwijd de afgelopen 25 jaar heel veel onderzoek gedaan is naar radon, maar slechts weinig naar thoron. Bij thoron zijn er dus meer onzekerheden dan bij radon. Het grote verschil komt voort uit het feit dat de halfwaardetijd van thoron zoveel korter is dan die van radon. Dat heeft een aantal gevolgen:

1. Thoron komt niet uit de kruipruimte en ook niet van buiten. Thoron kan alleen maar in de woning komen door *exhalatie* vanuit de buitenste lagen van wanden, vloeren en plafonds. Het gaat dus vooral om materialen waarmee de woning is afgewerkt (zie de tekstbox voor een overzicht van gangbare wandafwerkmaterialen). In tegenstelling tot radon heeft thoron niet de tijd om bijvoorbeeld diep vanuit steenachtige bouwmaterialen de binnenlucht te bereiken.
2. Thoron vervalt zo snel dat de thoronconcentratie in een ruimte niet overal hetzelfde is. Vlak bij een wand waar thoron vrijkomt, is de thoronconcentratie veel hoger dan midden in de kamer. (Dit geldt overigens niet voor de dochters van thoron, die bepalend zijn voor de blootstelling aan straling). Als je dus zomaar ergens in een kamer de thoronconcentratie meet, dan zegt dat niets over de concentratie in de rest van de ruimte.
3. Thoron vervalt heel snel, maar een van de dochters (Pb-212) heeft een halfwaardetijd van 11 uur. Dat is weer veel langer dan de

halfwaardetijden van de radondochters (maximaal 22 minuten). De concentratie van de thorondochters in een ruimte is dus heel anders dan die van thoron zelf.

Wat verstaan wij onder bouwmaterialen en wandafwerkmaterialen?

Met de term (steenachtige) bouwmaterialen bedoelen we in dit rapport grofstoffelijke materialen die voor een belangrijk deel bestaan uit bodemmateriaal en die vooral gebruikt worden voor de constructie van een woning. Het gaat dan bijvoorbeeld over beton, cement en bakstenen. Maar ook natuursteen, tegels en plavuizen vallen in deze categorie.

Als we het in dit rapport hebben over wandafwerkmaterialen, dan bedoelen we materialen met een minerale oorsprong die in een (relatief) dunne laag worden toegepast om muren en plafonds netjes af te werken. Het gaat dan om gips, leem, granol, spachtelputz en andere soorten sierpleister.

Om iets te kunnen zeggen over de schadelijkheid van thoron in de woning moeten we de evenwichtsconcentratie van de thorondochters kennen. Maar, in tegenstelling tot de situatie bij radon, kunnen we die niet simpel afleiden door de concentratie van thoron te meten. In plaats daarvan moeten we rechtstreeks naar de thorondochters kijken. In de volgende hoofdstukken wordt uitgelegd hoe we dit precies doen, en hoe we die metingen moeten interpreteren.

3 Opzet radon/thorononderzoek 2013-2014

3.1 Aanleiding en doel

In 2010 is het eindrapport gepresenteerd van een onderzoek naar radonconcentraties in woningen die gebouwd waren in de periode 1994-2003 (Bader, Dekkers et al. 2010). Uit dat onderzoek bleek dat radonmetingen die waren uitgevoerd in de jaren '80 en '90 een fout bevatten: er is toen een te hoge waarde gemeten. We veronderstelden toen dat die meetfout, in ieder geval ten dele, verklaard zou kunnen worden door het feit dat de toen gebruikte radondetectoren niet alleen gevoelig waren voor radon, maar ook voor thoron. Maar dat zou dan ook betekenen dat thoron in woningen een belangrijkere rol speelt dan eerder gedacht.

Om dit nader te onderzoeken, heeft het RIVM in de jaren daarna enkele oriënterende onderzoeken uitgevoerd, die dat vermoeden hebben bevestigd (Blaauboer 2010, Blaauboer 2012). Vervolgens is begin 2013 een nieuw groot landelijk onderzoek gestart naar radon- en thorondochterconcentraties in Nederlandse woningen (vanaf bouwjaar 1930[7]).

De belangrijkste onderzoeksvragen van de nieuwe radon/thoronsurvey waren:

1. Wat is de gemiddelde waarde en wat is de verdeling van de jaargemiddelde radonconcentratie in Nederlandse woningen?
2. Zien we daarbij ook verschillen, bijvoorbeeld voor verschillende bouwperiodes of voor verschillende regio's in Nederland?
3. Wat is de gemiddelde waarde en wat is de verdeling van de jaargemiddelde thorondochterconcentratie in Nederlandse woningen?
4. Meten we hier nog verschillen, bijvoorbeeld per bouwperiode of per regio?
5. Wat is het verband tussen de thorondochterconcentratie in een ruimte en de exhalatie van thoron uit de wand?



Figuur 8 Locatie van de circa 2500 woningen van het representatieve onderzoek.

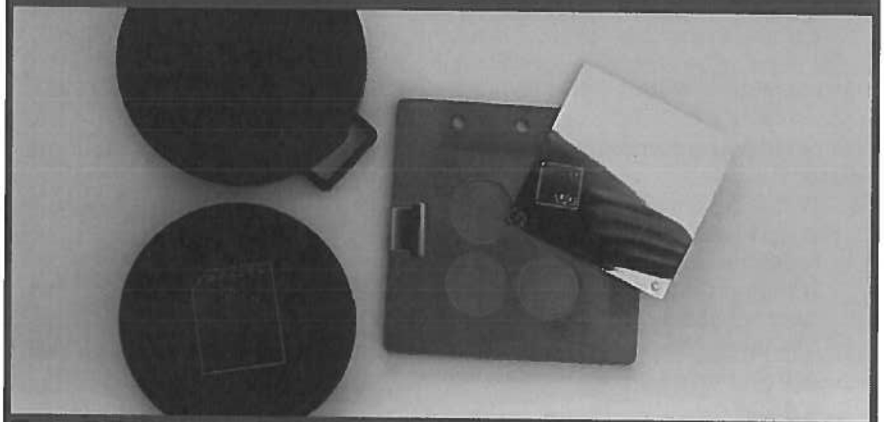
Voor de eerste vier onderzoeksvragen zijn, gedurende ruim een jaar, in ongeveer 2500 woningen metingen uitgevoerd van de jaargemiddelde radonconcentratie en de jaargemiddelde thorondochterconcentratie (zie

[7] Zo'n 10 tot 15% van de Nederlandse woningen is gebouwd vóór 1930. Die woningen zijn in dit onderzoek niet meegenomen, omdat die vaak niet meer als authentieke woningen van het betreffende bouwjaar te beschouwen zijn. Ook is het aantal nog bestaande oude woningen per bouwjaar gering en vaak is het bouwjaar niet of slecht bekend. Het valt overigens niet uit te sluiten dat er in de door ons gehanteerde steekproef enkele woningen zijn opgenomen, waarbij er een verschil is tussen het werkelijke bouwjaar en het bouwjaar volgens de Basisregistraties Adressen en Gebouwen (BAG).

Figuur 8). Voor de laatste vraag zijn in 75 andere woningen uitgebreidere metingen uitgevoerd.

Hoe werken de radondetector en de thorondochterdetector precies?

De radondetector (fabrikant: Landauer Nordic, Zweden) heeft een zwarte kunststofbuitenkant, die zo in elkaar zit dat radon wel in de detector kan doordringen, maar thoron niet. De radonconcentratie in de detector is gemiddeld even groot als in de ruimte waar de detector is geplaatst. Als radon binnen de detector vervalt, ontstaan er radondochters die niet meer uit de detector kunnen komen. In de detector bevindt zich een doorzichtig plastic plaatje. De alfastraling die vrijkomt bij het verval van radon en sommige dochters veroorzaakt heel kleine beschadigingen in dat plaatje. Na afloop van de meetperiode worden deze beschadigingen geteld. Hieruit kan de radonconcentratie in de ruimte, gemiddeld over de meetperiode, worden bepaald.



Figuur 9 Gedemonteerde radon- (links) en thorondochterdetector (rechts).

De thorondochterdetector (fabrikant: Flonex, Japan) is plat en bestaat uit vier kleine kunststofplaatjes met een laagje folie erop. Deze plaatjes kunnen ook beschadigd worden door straling, maar het laagje folie is zo dik dat de meeste straling er niet doorheen komt. Alleen de alfastraling van één van de vervalproducten van thoron (Po-212) is zo doordringend dat die wel door de folie gaat. Het meetprincipe is verder hetzelfde: door de beschadigingen in de kunststofplaatjes achteraf te tellen, weten we hoeveel thorondochters er gedurende de meettijd op de plaatjes neergeslagen zijn.

Een radonmeting geeft ons rechtstreeks informatie over de radon-concentratie in de woning. En het verband tussen de radonconcentratie en de radondochterconcentratie binnenshuis is bekend. Bij de thoronmeting weten we van één thorondochter hoeveel er is neergeslagen op de detector. De concentratie van de thorondochters in de ruimte waar de detector is geplaatst, moet uit deze indirecte meting berekend worden. Deze stap geeft iets meer onzekerheid in het resultaat, temeer omdat met deze meetmethode nog maar weinig ervaring is opgedaan.

3.2 Het landelijke onderzoek

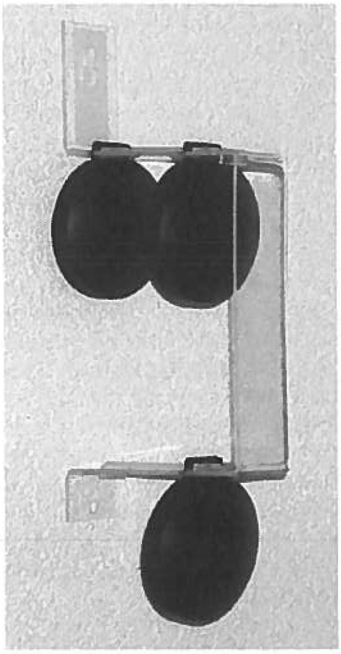
Voor het eerste deel van het onderzoek naar radon en thoron(dochters) in Nederlandse woningen heeft het RIVM in eerste instantie op willekeurige wijze een groep van bijna 10.000 woningen uitgekozen die representatief is voor het Nederlandse woningbestand vanaf 1930. De bewoners daarvan hebben het verzoek gekregen om aan dit onderzoek deel te nemen. Enkele duizenden bewoners hebben daarop positief gereageerd. De bewoners van bijna 2900 woningen hebben vervolgens twee zogenoemde passieve detectoren toegestuurd gekregen, met de vraag om die in huis te plaatsen. Met één detector kan de radonconcentratie worden bepaald, dat wil zeggen de gemiddelde waarde in de ruimte over de periode van plaatsing. De andere detector is speciaal ontworpen om de tijdsgemiddelde thorondochterconcentratie te kunnen bepalen (zie tekstbox en Figuur 9).

Ook hebben we de bewoners gevraagd om een vragenlijst in te vullen, zodat de meetresultaten uitgesplitst kunnen worden naar bijvoorbeeld wijze van ventilatie of rookgedrag.

Van ongeveer 2500 woningen hebben we betrouwbare meetgegevens gekregen. In ruim 2400 woningen is zowel een jaargemiddelde radonconcentratie als een jaargemiddelde thorondochterconcentratie bepaald. De grote groep van woningen wordt aangeduid als W2500.

3.3 Het aanvullende onderzoek

Voor het tweede deel van het onderzoek heeft het RIVM in een aanvullende (niet noodzakelijkerwijs representatieve) groep van ongeveer 75 woningen extra metingen uitgevoerd. Het doel hiervan was om meer inzicht te krijgen in het verband tussen de exhalatie van thoron uit wandafwerkmaterialen en de thorondochterconcentratie in de ruimte. In deze huizen werden één of meerdere thorondochterdetectoren geplaatst. Daarnaast zijn daar aanvullende metingen uitgevoerd met een triplet van detectoren dat in een vaste opstelling aan de muur werd bevestigd (zie Figuur 10). Met één detector werd de radonconcentratie bepaald. De andere twee detectoren waren gevoelig voor zowel radon als thoron. Omdat de (niet-plaatsafhankelijke) radonconcentratie apart gemeten werd, kon zo op twee verschillende, maar goed bepaalde afstanden van de muur de (wél plaatsafhankelijke) thoronconcentratie bepaald worden. Op basis van die twee meetwaarden is vervolgens de thoronexhalatie ter plekke berekend.



Figuur 10 Triplet voor de bepaling van de thoronexhalatie
De detectoren linksboven en onder meten radon en thoron. De detector rechtsboven meet alleen radon.

Dit onderdeel van het onderzoek heeft voor circa 75 woningen betrouwbare meetgegevens opgeleverd. Deze groep van woningen duiden we daarom aan als W75. In veel woningen zijn echter op meerdere plaatsen (groepen van) detectoren geplaatst. Zo zijn er in totaal 155 thoronexhalatiewaarden bepaald.

3.4 Tijdschema

De detectoren van de W2500-groep zijn opgestuurd en geplaatst in het voorjaar van 2013. Na ruim een jaar heeft het RIVM aan de bewoners gevraagd om de detectoren weer terug te sturen. Dat is gebeurd in het voorjaar en de zomer van 2014. De detectoren zijn vervolgens in groepen voor uitlezing verzonden naar de leveranciers (in Zweden voor de radondetectoren en in Japan voor de thorondochterdetectoren). De detectoren van de W75-groep zijn enkele maanden later geplaatst, en enkele maanden tot een halfjaar later teruggestuurd. De laatste detectoren waren in december 2014 binnen en zijn vervolgens eveneens voor uitlezing naar Zweden (triplet detectoren) en Japan (thoron-dochterdetectoren) verzonden. Het RIVM heeft de laatste ruwe data in januari 2015 ontvangen. Pas toen alle data binnen waren, kon het RIVM beginnen met de data-analyse.

3.5 Internationale auditcommissie

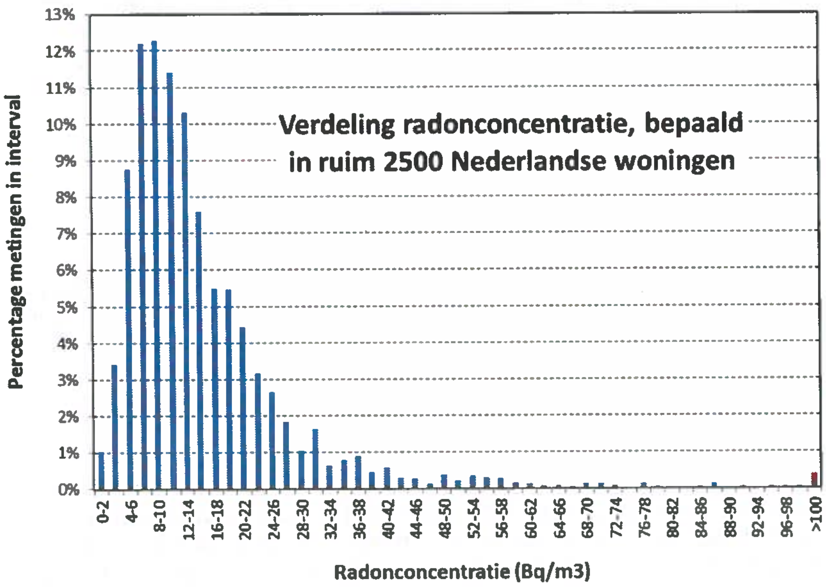
Zowel het onderzoek naar radon en thoron(dochters) in woningen als de interpretatie van de gegevens is ingewikkeld en bevat veel onzekerheden. Daar komt bij dat dit de eerste keer is dat er ergens in de wereld op zo'n grote schaal thorondochterconcentraties zijn gemeten in woningen. Omdat het RIVM er zeker van wil zijn dat de onderzoeksresultaten van hoge kwaliteit zijn, hebben we aan een internationale commissie, bestaande uit gerenommeerde radon/thorononderzoekers, gevraagd om een onafhankelijk oordeel uit te spreken over de kwaliteit van ons onderzoek en de wijze waarop we de data hadden geïnterpreteerd. Deze commissie, onder leiding van de Belgische hoogleraar Hans Vanmarcke van het Belgische Studiecentrum voor Kernenergie (SCK-CEN), heeft medio maart 2015 haar bevindingen gerapporteerd. De algemene conclusie luidde dat het RIVM *state of the art*-technieken heeft ingezet voor het onderzoek, en dat het onderzoek naar thorondochters in deze omvang uniek is. Ook kon de commissie zich vinden in de manier waarop het RIVM de data had geïnterpreteerd. Maar de commissie heeft ook enkele nuttige aanbevelingen gedaan, die meegenomen zijn in de verdere analyse van gegevens. Een meer uitgebreide weergave van de conclusies en de aanbevelingen van de internationale commissie wordt opgenomen in het Engelstalige wetenschappelijke eindrapport van het Nederlandse radon/thoron-onderzoek 2013-2014. Dat RIVM-rapport verschijnt naar verwachting eind 2015.

4 Resultaten bepaling radonconcentraties in woningen

4.1 Radonconcentraties in de representatieve groep woningen

De groep van bijna 2900 woningen waar een detector is geplaatst voor de bepaling van de radonconcentratie, heeft 2567 geldige data opgeleverd. Figuur 11 toont de verdeling van de meetresultaten.

De over alle woningen gemiddelde radonconcentratie bedraagt 15,6 Bq/m^3. In de helft van de woningen is de radonconcentratie lager dan 12,2 Bq/m^3, en in 95% is die lager dan 37,9 Bq/m^3. In 10 huizen (0,4%) zijn waarden gevonden tussen 100 en 200 Bq/m^3.



Figuur 11 Verdeling van de jaargemiddelde radonconcentratie in Nederlandse woningen vanaf 1930.
De metingen zijn in 2567 woningen verricht, in de periode 2013-2014. De grafiek geeft het percentage meetwaarden weer in intervallen met een breedte van 2 Bq/m^3. Ongeveer 0,4% van de gemeten radonconcentraties is hoger dan 100 Bq/m^3 (meest rechtse balkje).

In twee woningen zijn in dit onderzoek radonconcentraties gevonden die hoger zijn dan 300 Bq/m^3. In die woningen is, in goed overleg met de bewoners, met behulp van een andere meettechniek een verificatie-onderzoek uitgevoerd. In beide gevallen zijn tijdens de verificatie radonconcentraties gemeten die als normaal kunnen worden beschouwd. Waarom de eerder uitgevoerde radonmetingen zoveel hoger uitvielen, hebben we niet goed kunnen verklaren. De metingen in deze woningen zijn niet meegenomen in de data-analyse van radonconcentraties in Nederlandse woningen.

Er zijn ook radonmetingen uitgevoerd in de groep van 75 woningen waar meer uitgebreid onderzoek was gedaan. De verdeling van de radon-

concentraties in deze woningen is erg vergelijkbaar met de verdeling die gevonden is in de representatieve groep van ruim 2500 woningen. De resultaten van deze twee groepen zijn echter niet gecombineerd, omdat daarmee de representativiteit van het onderzoek zou zijn geschaad.

4.2 Uitsplitsing naar groepen

We hebben onderzocht of de radonconcentratie afhankelijk is van het gedrag van bewoners of het type, het bouwjaar of de locatie van de woning. Die analyse heeft het volgende opgeleverd.

Als we de woningen in de steekproef onderverdelen in eengezins- en meergezinswoningen[8], dan zien we dat de gemiddelde radonconcentratie in meergezinswoningen 16% lager is dan het landelijk gemiddelde. In eengezinswoningen is de radonconcentratie juist 5% hoger. Dit komt vermoedelijk doordat de meeste metingen plaatsvonden in woonkamers. Woonkamers in eengezinswoningen bevinden zich doorgaans op de begane grond. Eengezinswoningen worden daarom ook wel *grond-gebonden* woningen genoemd. Bij een groot deel van de meergezins-woningen bevindt de woonkamer zich op een hogere verdieping, waar radon dat uit de bodem ontsnapt minder bijdraagt aan de radon-concentratie.

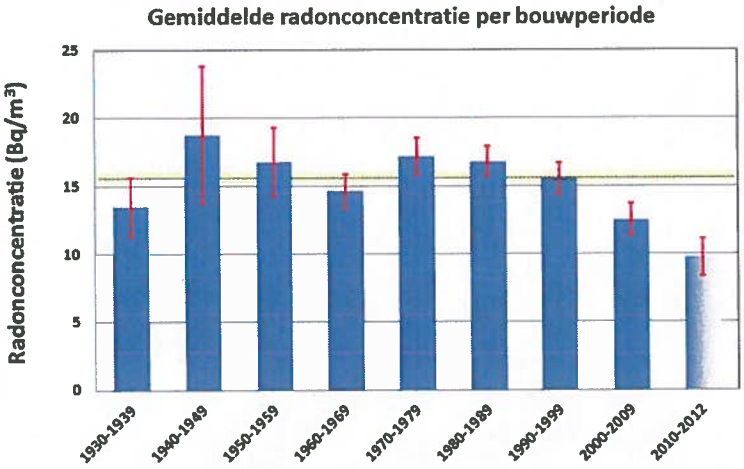
Ook zien we een verband tussen het type ventilatiesysteem dat in de woning aanwezig is en de radonconcentratie: in huizen met een natuurlijke ventilatie is de gemiddelde radonconcentratie hoger dan in huizen met een andere vorm van ventilatie. Het verschil bedraagt ruim 10%. Let wel, we hebben hier alleen gekeken naar het *soort ventilatiesysteem* in de woning. De werkelijke ventilatie van iedere woning kennen we niet, onder meer omdat we niet bekend zijn met het individuele ventilatiegedrag van bewoners.

In huizen waar volgens de bewoners wordt gerookt, is de gemiddelde radonconcentratie ongeveer 12% lager dan in huizen waar niet wordt gerookt[9]. Het zou kunnen dat in huizen waar wordt gerookt, er extra wordt geventileerd. Bijvoorbeeld door vaker een raam open te zetten, of door het mechanische ventilatiesysteem in een hogere stand te zetten. Maar deze veronderstelling is niet onderzocht.

We hebben ook gekeken naar de gemiddelde radonconcentratie in woningen uit bouwperiodes van steeds tien jaar. In de vorige eeuw zien we weliswaar verschillen per bouwperiode, maar als we ook naar de onzekerheden kijken, dan wijken die gemiddelden per bouwperiode niet of nauwelijks af van de gemiddelde waarde over alle woningen (zie Figuur 12). Maar in bouwperiodes vanaf 2000 zien we significant lagere waarden. Om precies te zijn, de gemiddelde radonconcentratie in huizen uit deze eeuw is 22% lager dan de gemiddelde waarde over alle

[8] Meergezinswoningen bevinden zich in een gebouw dat meerdere woningen omvat. Deze categorie bestaat uit flats, maisonnettes, etagewoningen en studentenwoningen. Onder eengezinswoningen verstaan we vrijstaande woningen, bungalows, rijtjeshuizen, herenhuizen en boerderijen.
[9] In hoofdstuk 6 wordt toegelicht dat blootstelling aan radon en thorondochters voor rokers veel schadelijker is dan voor nooit-rokers: de kans op longkanker 'door radon en thoron' is voor rokers ongeveer 25 keer zo hoog als voor nooit-rokers. Dat de gemeten concentraties in huizen van rokers iets lager zijn, doet daar weinig aan af.

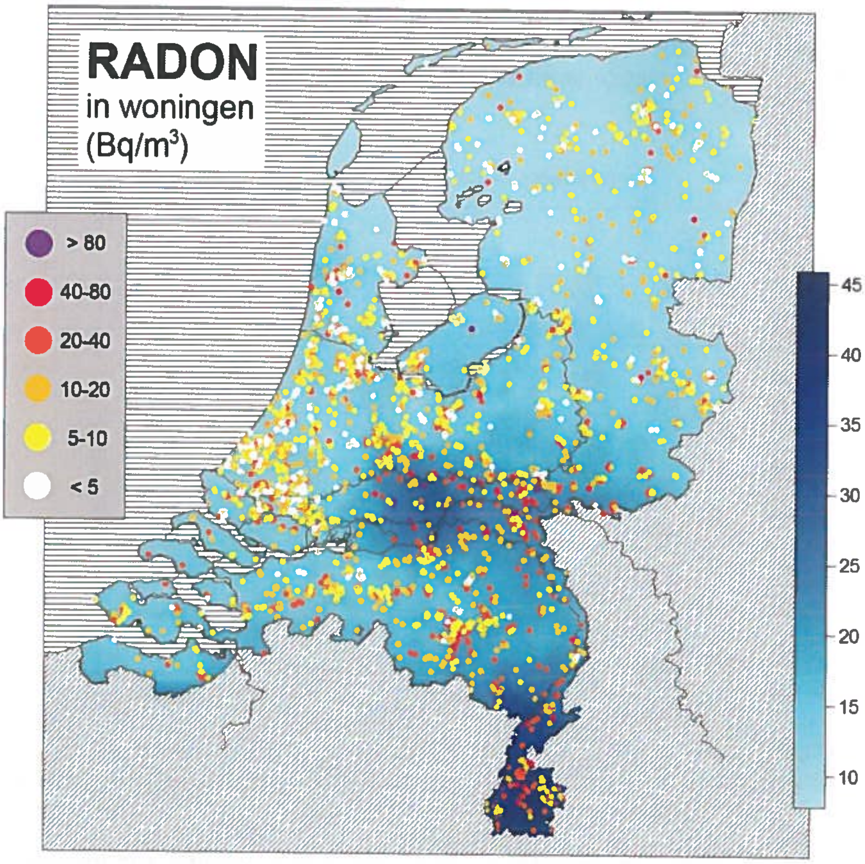
woningen sinds 1930. Aan de in 2004 gemaakte afspraak tussen overheid en bouwwereld om de blootstelling aan straling in nieuwbouwwoningen niet te laten toenemen, is wat radon betreft dus ruimschoots voldaan.



Figuur 12 Gemiddelde radonconcentratie per bouwperiode.
De blauwe balken tonen de gemiddelde concentratie van radon in woningen, gebouwd in periodes van tien jaar, met uitzondering van de meest recente periode (bouwjaar 2010 t/m 2012). De rode lijnen geven de onzekerheid weer in de gemiddelde waarden. De horizontale, gele lijn toont de radonconcentratie, gemiddeld over alle woningen. De dikte van die lijn is een maat voor de onzekerheid.

Tenslotte hebben we gekeken of de locatie van de woning van invloed is op de gemiddelde radonconcentratie. Dat blijkt inderdaad zo te zijn. De gemiddelde radonconcentratie in Nederlandse woningen is 15,6 Bq/m^3, maar als we kijken naar verschillende gebieden in Nederland, dan zien we in Noord- en West-Nederland relatief lage waarden, in de buurt van 10 Bq/m^3, en in Zuidoost-Nederland en het rivierengebied wat hogere waarden, tot ongeveer 40 Bq/m^3 in Zuid-Limburg (zie Figuur 13).

We hebben in dit onderzoek niet specifiek onderzocht hoe dit komt, maar op basis van eerder onderzoek hebben we toch een aantal aannemelijke verklaringen. Zoals uitgelegd in hoofdstuk 2, komt radon op drie manieren in de woning: vanuit de bodem (vaak via de kruipruimte), vanuit de buitenlucht en vanuit bouwmaterialen. Alle drie de paden kennen een zekere locatieafhankelijkheid, maar de invloed van de lokale bodemsoort en gesteldheid is waarschijnlijk het grootst. We weten namelijk dat in sommige grondsoorten, zoals löss, meer radium zit dan in bijvoorbeeld zand- en veengronden (Smetsers and Blaauboer 1996). Het is dus niet vreemd dat er in Zuid-Limburg, waar we vooral löss aantreffen, meer radon uit de bodem komt dan elders in Nederland. Ook in de buitenlucht meten we in Zuid-Limburg iets hogere radonconcentraties, wat ook doorwerkt naar de concentratie binnen. De waargenomen verdeling van lagere radonconcentraties in woningen in Noord- en West-Nederland en iets hogere concentraties in het rivierengebied en Zuidoost-Nederland is dus niet verrassend.



Figuur 13 Locatieafhankelijkheid van de radonconcentratie in woningen.
De gekleurde stippen tonen de radonconcentraties van individuele woningen in zes verschillende klassen. De blauwige achtergrond geeft een indicatie van de regionale, gemiddelde waarde.

4.3 Onzekerheden in de meetresultaten

Als iemand met een duimstok de lengte van een tafel opmeet, dan zal er altijd sprake zijn van enige onzekerheid in het resultaat. Afhankelijk van de precisie van de duimstok en de nauwkeurigheid van de persoon die de meting uitvoert, zal die onzekerheid al gauw een paar millimeter bedragen, of misschien zelfs wel een centimeter. Deze onzekerheid kan ook worden uitgedrukt in procenten ('relatieve onzekerheid'). We nemen als voorbeeld even de tafel van zojuist. Als die tafel anderhalve meter lang is (150 cm) en de meetonzekerheid een halve centimeter, dan is de relatieve onzekerheid in het meetresultaat 0,5/150 x 100% = 0,33%.

Bij de metingen die in dit onderzoek zijn uitgevoerd, is ook sprake van onzekerheid. Maar dat is een stuk ingewikkelder dan in het geval van het opmeten van de lengte van een tafel. Er zijn namelijk veel factoren die bijdragen aan de meetonzekerheid van radon- en thorondochter-metingen. Het gaat te ver om deze onzekerheidsanalyse hier uitvoerig te bespreken, maar we kunnen wel enkele vuistregels geven:

- De relatieve onzekerheid van één enkele meting is groter naarmate de meetwaarde lager is, en andersom. Dat is het gevolg van de zogenoemde telstatistiek[10].
- De onzekerheid in een gemiddelde waarde is veel kleiner dan de onzekerheid in één enkele meetwaarde.

De relatieve onzekerheid in een individuele radonmeting in dit onderzoek bedraagt ongeveer 17% bij waarden in de buurt van het landelijk gemiddelde (15,6 Bq/m^3) en 13% bij waarden rond 50 Bq/m^3. Maar naarmate de meetresultaten lager worden dan 10 Bq/m^3, neemt de relatieve onzekerheid snel toe.

De relatieve onzekerheid in het gemiddelde over alle metingen bedraagt slechts 1,7%. Maar als we het gemiddelde bepalen van een veel kleinere groep metingen, dan valt de relatieve meetonzekerheid weer wat hoger uit.

Bij de vorige nationale radonsurvey zijn nieuwbouwwoningen onderzocht uit de periode 1994-2003. De nu gemeten radonconcentraties in woningen uit diezelfde periode, zijn binnen de meetonzekerheid gelijk aan de resultaten van de vorige survey, zoals gerapporteerd in 2010 (Bader, Dekkers et al. 2010).

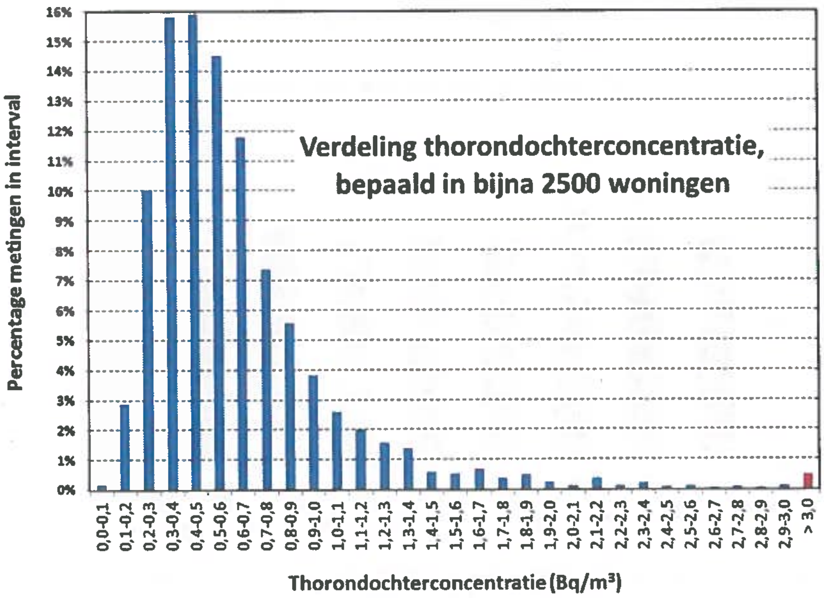
[10] Vergelijk dat met het gooien van kop of munt: als je dat tienduizend keer doet, dan zit je dichter bij de verwachte uitkomst van 50% kop, 50% munt, dan wanneer je maar 100 keer gooit. Uit de theorie van de telstatistiek volgt dat de relatieve onzekerheid in een meting, gebaseerd op 10.000 worpen, 1% bedraagt. Maar als je de munt maar 100 keer opgooit, dan is die onzekerheid een stuk groter, nl. 10%. Iets dergelijks geldt ook voor de detectoren die in dit onderzoek zijn gebruikt. Een hoge concentratie geeft veel beschadigingen in het folie van de detector, en dus een kleine relatieve onzekerheid in de meting. Maar een lage concentratie levert maar een paar beschadigingen op, waardoor de relatieve onzekerheid in de meetwaarde groter is.

5 Resultaten metingen thorondochters en thoronexhalatie

5.1 Thorondochterconcentraties in de representatieve groep woningen

De groep van bijna 2900 woningen waar een detector is geplaatst voor de bepaling van de thorondochterconcentratie, heeft 2461 geldige data opgeleverd. Figuur 14 toont de verdeling van de meetresultaten.

De gemiddelde waarde van alle thorondochterconcentraties in de representatieve groep van woningen vanaf 1930 bedraagt 0,64 Bq/m^3. In de helft van de woningen vinden we waarden lager dan 0,53 Bq/m^3 en in 95% van de woningen is de thorondochterconcentratie lager dan 1,37 Bq/m^3. Ongeveer 0,5% van de metingen is hoger dan 3 Bq/m^3. De hoogst gevonden waarde bedraagt 13,3 Bq/m^3.



Figuur 14 Verdeling van de jaargemiddelde thorondochterconcentratie in Nederlandse woningen vanaf 1930.
De metingen zijn in 2461 woningen verricht, in de periode 2013-2014. De grafiek geeft het percentage meetwaarden weer in intervallen van 0,1 Bq/m^3. Ongeveer 0,5% van de gemeten thorondochterconcentraties is hoger dan 3 Bq/m^3 (meest rechtse balkje).

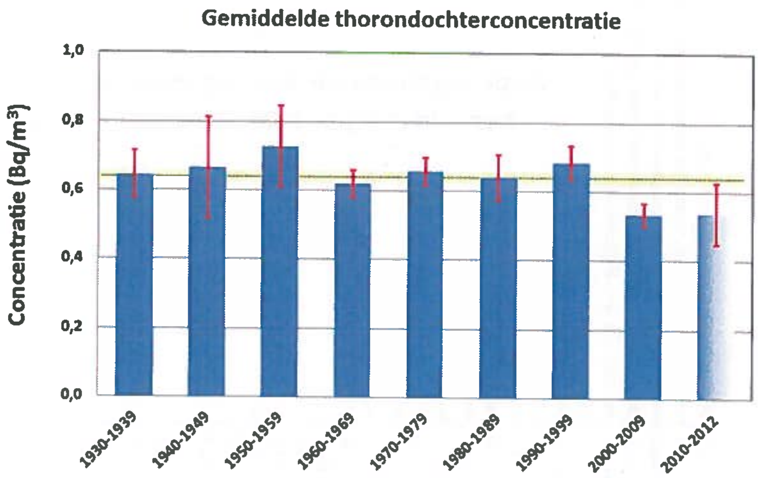
Er zijn ook thorondochtermetingen uitgevoerd in de groep van 75 woningen waar meer uitgebreid onderzoek is gedaan. De verdeling van die metingen is erg vergelijkbaar met de verdeling die gevonden is in de representatieve groep van bijna 2500 woningen. Zoals eerder gemeld, zijn de resultaten van deze twee groepen niet gecombineerd, omdat daarmee de representativiteit van het onderzoek zou zijn geschaad.

5.2 Uitsplitsing naar groepen

Net als bij radon hebben we hier onderzocht of de thorondochter-concentratie afhankelijk is van het gedrag van bewoners of het type, het bouwjaar of de locatie van de woning. Die analyse heeft het volgende opgeleverd.

Bij de thorondochterconcentratie zien we geen verschil tussen eengezins- en meergezinswoningen. Dit in tegenstelling tot radon, waar we zulke verschillen wel zagen. Ook zien we geen statistisch significante invloed van het type ventilatiesysteem in de woning op de thorondochterconcentratie.

Figuur 15 toont de gemiddelde thorondochterconcentratie in bouw-periodes van telkens tien jaar (met uitzondering van de periode 2010 t/m 2012). Net als bij radon zien we in de vorige eeuw verschillen per bouwperiode, maar als we de onzekerheden in de resultaten meewegen, dan wijken de gemiddelden per bouwperiode niet of nauwelijks af van het gemiddelde over alle woningen sinds 1930. Maar de thorondochter-concentratie in woningen die in deze eeuw zijn gebouwd, is gemiddeld ruim 15% lager dan de gemiddelde waarde over alle woningen.



Figuur 15 Gemiddelde thorondochterconcentratie per bouwperiode.
De blauwe balken tonen de gemiddelde thorondochterconcentratie in woningen, gebouwd in periodes van telkens tien jaar, met uitzondering van de meest recente periode (bouwjaar 2010 t/m 2012). De rode lijnen geven de onzekerheid weer in de gemiddelde waarden. De horizontale, gele lijn toont de thorondochterconcentratie, gemiddeld over alle woningen vanaf 1930. De dikte van die lijn is een maat voor de onzekerheid.

In huizen waar volgens de bewoners wordt gerookt, is de gemiddelde thorondochterconcentratie 8% lager dan in huizen waar niet wordt gerookt[11]. Dit resultaat lijkt op dat van radon, maar het verschil is nu minder groot. Zoals eerder gemeld, zou het kunnen dat bewoners van

[11] In hoofdstuk 6 wordt toegelicht dat blootstelling aan radon en thorondochters voor rokers veel schadelijker is dan voor niet-rokers: de kans op longkanker 'door radon en thoron' is voor rokers ongeveer 25 keer zo hoog als voor nooit-rokers. Dat de gemeten concentraties in huizen van rokers iets lager zijn, doet daar weinig aan af.

huizen waar wordt gerookt, extra ventileren. Uit modelberekeningen blijkt dat het reducerende effect van extra ventilatie op de concentratie van gasvormig radon sterker is dan het effect op niet-gasvormige thorondochterproducten. De gevonden verschillen tussen huizen waar wel en niet gerookt wordt, zouden dus inderdaad terug te voeren kunnen zijn op een verschil in ventilatiegedrag, maar deze veronderstelling is niet verder onderzocht.

Ten slotte hebben we gekeken naar de afhankelijkheid van de locatie op de thorondochterconcentratie in de woning. Die blijkt er niet of nauwelijks te zijn. En dat is ook logisch, want thoron komt, zoals besproken in hoofdstuk 2, alleen maar vanuit wandafwerkmaterialen in de woning. Omdat thoron zo snel vervalt, is de weg vanuit de bodem naar de woning immers veel te lang. En ook van buiten komt er geen thoron de woning in.

5.3 Thoronexhalatiemetingen in een kleinere groep woningen

Bij het onderzoek naar radonconcentraties in nieuwbouwwoningen uit de periode 1994-2003, is ontdekt dat de daarvóór gebruikte radon-detectoren niet alleen gevoelig waren voor radon, maar vermoedelijk ook voor thoron (Bader, Dekkers et al. 2010). En thoron zou dan ook een belangrijkere rol spelen dan aanvankelijk was gedacht. In aanvullend onderzoek zijn deze vermoedens onderzocht en bevestigd (Blaauboer 2010, Blaauboer 2012). Tijdens deze onderzoeken werden grote verschillen gevonden in de exhalatie van thoron uit verschillende partijen gips. Maar het aantal metingen dat toen is uitgevoerd, was te klein om conclusies te kunnen trekken. Om die reden is in dit onderzoek een extra meetprogramma opgenomen naar de exhalatie van thoron.

In totaal zijn er in circa 75 woningen 155 thoronexhalatiemetingen uitgevoerd. Soms in verschillende ruimtes in dezelfde woningen, maar soms ook op meerdere plaatsen op één muur. In de helft van de gevallen was de thoronexhalatie lager dan 0,022 Bq/(m^{2}s). In ongeveer twee derde van alle exhalatiemetingen vinden we resultaten tot twee keer deze zogenaamde *mediane* waarde. Maar ongeveer tien procent van de metingen valt veel hoger uit: daar vinden we waarden variërend van tien tot vijftig keer de mediane waarde. Net als in de pilotstudie van een paar jaar geleden vinden we dus opnieuw grote verschillen in de exhalatie van thoron uit wanden. En omdat thoron een zeer korte halveringstijd heeft, moet het hier gaan om grote verschillen in de exhalatie van thoron uit ter plaatse toegepaste wandafwerkmaterialen.

In de W75 woningen is ook gekeken naar de concentratie van thoron-dochters. De verdeling daarvan lijkt veel op de verdeling die we gevonden hebben in de grote groep van 2500 woningen. Dus ook hier treffen we enkele woningen aan met een iets hogere thorondochter-concentratie, maar dat aantal woningen is gering.

We zien dus dat er bij één op de tien exhalatiemetingen sprake is van een hoge thoronexhalatie, maar dat leidt slechts in enkele woningen tot een hogere thorondochterconcentratie. Waarschijnlijk komt dat door het feit dat de exhalatie van thoron op één bepaalde plek op de muur wordt gemeten, maar dat punt hoeft niet representatief te zijn voor het gehele

oppervlak van de ruimte waar gemeten wordt. De thorondochter-concentratie is echter het resultaat van de exhalatie van thoron uit het volledige wandoppervlak van de ruimte.

Op dit moment hebben we te weinig kennis over de exhalatie van thoron uit verschillende typen en partijen wandafwerkmaterialen. Om die reden kunnen we het precieze verband tussen de thoronexhalatie uit de wand en de concentratie van thorondochters in de woning nog niet geven.

5.4 Onzekerheden in de meetresultaten

Net zoals bij radon hebben we ook bij thoron-, thorondochter- en thoronexhalatiemetingen te maken met een onzekerheid in de meetresultaten. Voor een deel gaat het om *toevallige* onzekerheden door telstatistiek: ook hier is de relatieve onzekerheid groter bij lage meetresultaten, en kleiner bij hoge meetresultaten. Dit speelt nog sterker bij de bepaling van de thoronexhalatiegegevens, want daar worden ook nog eens berekeningen uitgevoerd. En als je dan twee kleine getallen van elkaar aftrekt die allebei een hoge relatieve onzekerheid hebben, dan is de relatieve onzekerheid in het verschil nóg groter.

Maar daarnaast is er bij de thorondochtermetingen sprake van een extra, zogenoemde *systematische* onzekerheid. Dat betekent dat alle resultaten in werkelijkheid iets hoger zouden kunnen zijn dan gemeten, of juist iets lager[12]. Dat geldt dus ook voor bijvoorbeeld gemiddelden, want een systematische onzekerheid middelt niet uit als we een berekening uitvoeren op een grote groep data. Deze systematische onzekerheid is het gevolg van de vertaalslag die we moeten maken van de meting van het aantal neergeslagen Po-212 atomen op de detector naar de evenwichtsconcentratie van thorondochters in de ruimte. De gegevens die we voor deze berekening gebruiken, zijn bepaald in Japan. Maar in theorie is het mogelijk dat de situatie in Nederland net iets anders is, zodat onze metingen óf een te hoge, óf een te lage inschatting geven van de werkelijkheid.

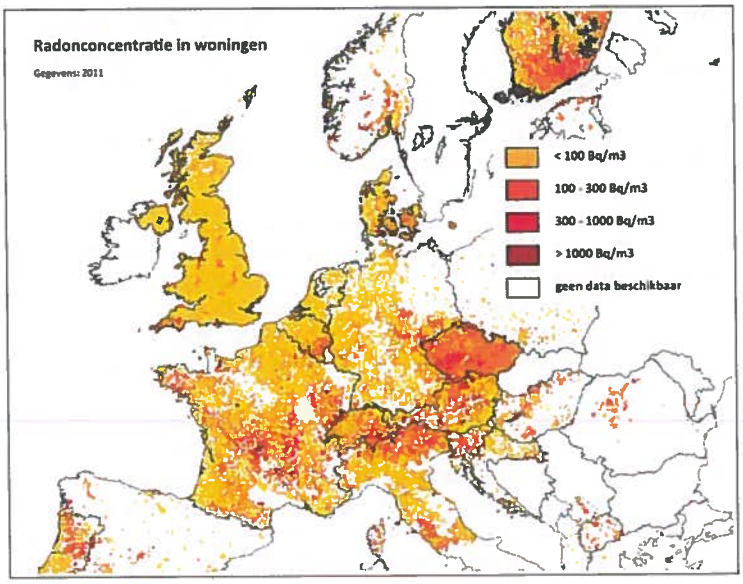
Bij de beoordeling van de thoronresultaten van dit onderzoek moet men zich bewust zijn van al deze onzekerheden in de meetgegevens.

[12] Vergelijk dit bijvoorbeeld met de snelheidsmeter van een auto, die in bijna alle auto's *systematisch* een te hoge waarde aangeeft. Maar bij een gegeven snelheid (zeg 100 km/u) is de waarde die de snelheidsmeter aangeeft (bijvoorbeeld 108 km/u) wel altijd hetzelfde. Dit in tegenstelling tot een gps, die op basis van plaatsbepaling m.b.v. satellieten gemiddeld genomen precies de juiste snelheid aangeeft. Maar als een gps een slechte ontvangst heeft, bijvoorbeeld in de bossen of bij erg slecht weer, dan is die plaatsbepaling onzeker. Dat resulteert dan in *toevallige fouten* in de berekening van de snelheid. De meeste snelheidsmeters hebben dus wel een systematische afwijking, maar geen statistische meetonzekerheid. Bij een gps is dat net andersom.

6 Wat betekenen deze resultaten?

6.1 Nederland, vergeleken met andere landen in Europa

In dit onderzoek hebben we voor Nederland regiogemiddelde radonconcentraties in woningen gevonden tussen 10 en 40 Bq/m^3. In andere Europese landen komen veel hogere regiogemiddelde waarden voor (zie Figuur 16). In België zien we een groot verschil tussen Vlaanderen (laag) en de Ardennen (hoog): in sommige gemeentes in de Ardennen heeft zelfs meer dan 10% van de huizen een radonconcentratie van meer dan 400 Bq/m^3. In Duitsland zien we overwegend lage radonconcentraties in woningen, ook aan de grens met Nederland, maar in het zuidoosten treffen we regio's aan waar de gemiddelde waarde boven 80 Bq/m^3 ligt. In Tsjechië is de radonconcentratie in woningen zelfs in bijna het hele land hoog. In grote delen van het Verenigd Koninkrijk zijn de radonconcentraties in woningen vergelijkbaar met Nederland, maar er zijn uitzonderingen. Dat geldt bijvoorbeeld voor Cornwall, in de zuidwestpunt van Engeland. In sommige gebieden kun je daar in meer dan 30% van de huizen een radonconcentratie verwachten boven 200 Bq/m^3. Ook in landen als Frankrijk, Zweden, Zwitserland, Finland en Portugal tref je regio's aan met een gemiddelde radonconcentratie die vele malen hoger is dan waar ook in Nederland. Afhankelijk van de streek zien we dus grote verschillen. Volgens de internationale wetenschappelijke commissie UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) bedraagt de wereldwijd gemiddelde radonconcentratie ongeveer 45 Bq/m^3 (UN 2010).



Figuur 16 De radonconcentratie in Europese woningen, gemiddeld per regio.
Deze kaart van de Europese Commissie is gebaseerd op gegevens die in 2011 beschikbaar waren (EU 2013). In het huidige onderzoek zijn voor Nederland regiogemiddelde waarden gevonden tussen 10 en 40 Bq/m^3, die onze relatief gunstige situatie bevestigen.

Dat er zulke grote regionale verschillen zijn in de radonconcentratie in woningen is vooral het gevolg van verschillende bodemsoorten. Daarbij zijn twee effecten van belang: hoeveel radium zit er in de bodem, en hoe gemakkelijk kan het daaruit ontstane radon ontsnappen en in woonhuizen terechtkomen? Hoge radonconcentraties vinden we bijvoorbeeld in rotsachtige gebieden, waar niet alleen veel radon ontstaat, maar waar het radon via spleten in de bodem gemakkelijk in de kruipruimte kan komen. En van daaruit in de woonruimtes. Als het huis dan ook nog wordt verwarmd, treedt er een soort schoorsteen-werking op, waardoor er nog meer radon uit de bodem wordt aangezogen. Maar dat zijn situaties die we in Nederland niet of nauwelijks tegenkomen.

Het in Nederland uitgevoerde landelijke onderzoek naar concentraties van thorondochters in woningen is qua opzet en omvang uniek in de wereld. Er zijn dus geen representatieve waarden van andere landen beschikbaar waarmee de Nederlandse resultaten vergeleken kunnen worden. Wel zijn er in het verleden op verschillende plaatsten in de wereld kleinere onderzoeken uitgevoerd. In deze onderzoeken zijn waarden gevonden in de orde van 0,5 Bq/m^3. Volgens de ICRP (International Commission on Radiological Protection) mag je voor de thorondochterconcentratie in woningen waarden verwachten van 0,04–2 Bq/m^3, met een gemiddelde van 0,5 Bq/m^3 (ICRP 1987). Ruim 98% van de waarden die in ons onderzoek zijn gevonden, valt in het bereik van 0,04–2 Bq/m^3. Maar in bijna 2% van de woningen hebben we hogere waarden gevonden, tot een maximum van 13,3 Bq/m^3.

6.2 Wat zijn de gezondheidseffecten van radon en thoron?

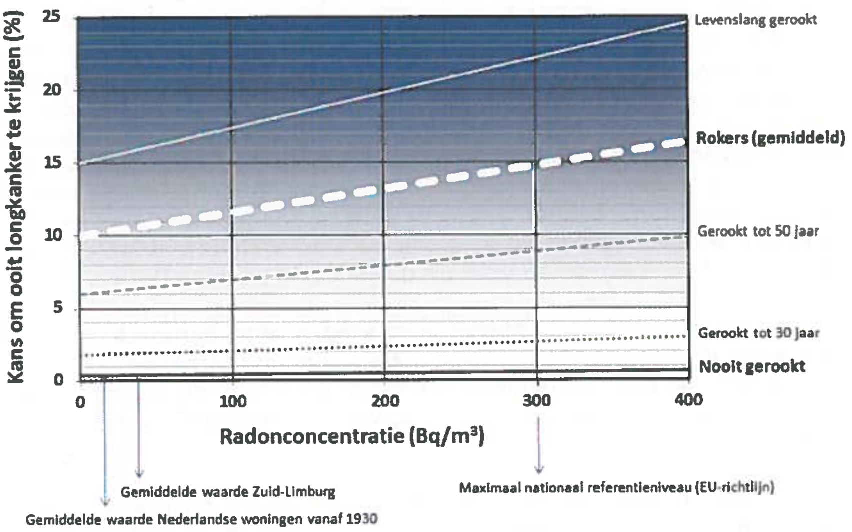
Als radon- of thorondochters in de longen terechtkomen, dan geven ze daar straling af. Die straling kan cellen beschadigen, waardoor er op lange termijn longkanker kan ontstaan. Dit is een kansproces, vergelijkbaar met een loterij. Als iemand weinig radon- en thorondochters inademt, dan is de kans op longkanker erg klein, maar naarmate de blootstelling toeneemt, neemt ook het risico toe.

Gedrag beïnvloedt de schadelijkheid van straling in de longen. Na vele jaren van onderzoek staat nu vast dat de negatieve gezondheidseffecten van radon- en thorondochters voor rokers veel sterker zijn dan voor nooit-rokers. Rokers hebben sowieso een veel grotere kans om longkanker te krijgen, maar hun risico door blootstelling aan radon- en thorondochters is in vergelijking met nooit-rokers dus ook hoger.

Onderzoek naar de relatie tussen blootstelling aan radon of thoron en het optreden van gezondheidseffecten is niet eenvoudig. De getallen die het verband leggen tussen blootstelling en de kans op kanker zijn nog onzeker en in de wetenschappelijke wereld is er nog veel discussie over dit onderwerp. Maar op basis van wat er nu allemaal bekend is, kunnen we toch een aantal *vuistregels* geven. Die zijn voor een belangrijk deel ontleend aan een toonaangevend onderzoek van Darby en collega's naar de relatie tussen longkanker, roken en radon in Europese woningen (Darby, Hill et al. 2004).

Vuistregels over de gezondheidseffecten van radon en thoron:

1. De kans dat iemand die nooit gerookt heeft en die niet is blootgesteld aan radon of thoron, ooit longkanker krijgt is ongeveer 400 op de 100.000.
2. Voor mensen die wel roken of gerookt hebben, is die kans veel groter: binnen de groep 'rokers' krijgen, nog afgezien van blootstelling aan radon en thoron, ruim 10.000 op de 100.000 personen ooit longkanker. NB: Figuur 17 laat meerdere kansen zien, uitgesplitst naar rookgedrag.
3. Voor zowel rokers als nooit-rokers neemt de kans om ooit longkanker te krijgen met circa 50% toe als zij langdurig zijn blootgesteld aan een radonconcentratie van 300 Bq/m^3. Bij die blootstelling is de kans op longkanker voor nooit-rokers dus toegenomen van 400 naar 600 per 100.000 personen en voor rokers van 10.000 naar 15.000 per 100.000 personen.
4. De situatie voor thoron is iets minder goed bekend, maar de vuistregel hier luidt dat het effect van langdurige blootstelling aan een thorondochterconcentratie van 30 Bq/m^3 vergelijkbaar is met het effect van langdurige blootstelling aan een radonconcentratie van 300 Bq/m^3. Qua gezondheidseffect zit er dus een factor tien tussen de radonconcentratie en de thorondochterconcentratie.



Figuur 17 Kans om ooit in je leven longkanker te krijgen, als functie van de radonconcentratie.

Darby, Hill et al. (2004) hebben daarbij aangenomen dat de persoon in kwestie langdurig aan deze concentratie is blootgesteld. De kansen hangen sterk af van het rookgedrag. De linkerpijl toont de gemiddelde radonconcentratie die in dit onderzoek is bepaald voor alle Nederlandse woningen vanaf 1930. Daarnaast is de in Zuid-Limburg gevonden gemiddelde waarde aangegeven. In een recente Europese aanbeveling wordt een nationaal referentieniveau gegeven van maximaal 300 Bq/m^3 (rechterpijl).

Figuur 17 toont voor nooit-rokers (onderste zwarte lijn) en rokers (dikke witte streepjeslijn) de kans op longkanker als functie van de radonconcentratie waaraan zij langdurig worden blootgesteld. De dikke witte

streepjeslijn geeft het gemiddelde resultaat voor de gehele groep van (ooit-)rokers. De kansen voor mensen die relatief weinig roken of op een zekere leeftijd gestopt zijn, liggen daaronder. Voor levenslange rokers ligt de kans op longkanker daarboven.

De grafiek voor de kans op longkanker als functie van de thorondochter-concentratie is hetzelfde, alleen loopt de horizontale as dan van 0 tot 40 Bq/m^3, in plaats van tot 400 Bq/m^3.

6.3 Vertaling van meetwaarden naar gezondheidsrisico's

Het is niet mogelijk om individuele meetwaarden uit één woning te vertalen naar gezondheidsrisico's voor de bewoners van die woning. Daarvoor hebben we te weinig informatie. In het grote W2500-onderzoek hebben we bijvoorbeeld maar in één ruimte gemeten, en je mag niet zonder meer aannemen dat in alle ruimtes van de woning de radon- of thorondochterconcentraties gelijk zijn. Maar ook kennen we het gedrag van individuele bewoners onvoldoende. Vooral de verblijftijd in de betreffende woning is een belangrijke parameter, maar die kennen we niet.

Wel kunnen we voor enkele 'typische situaties' het gezondheidsrisico uitrekenen. Dat hebben we gedaan voor een 'normale' en een 'bijzondere' situatie. Bij de *normale* situatie gaan we ervan uit dat mensen het grootste deel van hun leven worden blootgesteld aan radon- en thorondochterconcentraties die erg veel lijken op de in dit onderzoek gevonden gemiddelde waarde over alle woningen. Voor radon is dat 15,6 Bq/m^3, en voor de thorondochters 0,64 Bq/m^3. Voor de *bijzondere* situatie gaan we ervan uit dat iemand een groot deel van zijn leven in een woning woont waar de radon- of thorondochterconcentratie hoger is dan gemiddeld. We hebben daarvoor de waarden uit dit onderzoek gekozen, waarvoor geldt dat 95% van de woningen daar onder zit. Voor radon is dat 37,9 Bq/m^3 en voor de thorondochters 1,37 Bq/m^3.

In een groep van 100.000 nooit-rokers krijgen ruim vierhonderd personen, los van enige blootstelling aan radon of thoron, ooit longkanker. Bij een blootstelling aan radon en thoron die normaal is in Nederland, komen daar naar schatting veertien gevallen bij, tien door radon en vier door thoron.

Vergeleken met nooit-rokers is het risico voor rokers ongeveer 25 keer hoger. In een groep van 100.000 rokers krijgen ruim 10.000 personen longkanker. Door radon en thoron komen er daar in Nederland naar schatting 350 bij, 250 door radon en 100 door thoron.

Ten opzichte van de normale situatie neemt het extra risico door blootstelling aan radon of thoron in de bijzondere situatie (zie boven) met ongeveer een factor twee toe.

In Tabel 1 zijn de longkanker risico's voor alle boven genoemde situaties samengevat.

Tabel 1. Aantal mensen uit een groep van 100.000 rokers en nooit-rokers die ooit in hun leven longkanker krijgen.

Aantallen per 100.000	Rokers[1)]	Nooit-rokers
Basisrisico (dus zonder radon/thoron)	*10.100*	*410*
Door radon, normale situatie	250	10
Door thoron, normale situatie	100	4
Door radon, bijzondere situatie	500	20
Door thoron, bijzondere situatie	200	8

In de groep van rokers (links) krijgt ruim 10% longkanker als gevolg van roken. Bij een blootstelling die normaal is voor Nederland voegen radon en thoron daar samen 0,35% aan toe. Als de levenslange blootstelling aan radon en thoron voor Nederlandse begrippen relatief hoog is, dan verdubbelt het risico door radon en thoron tot 0,7%. Voor nooit-rokers (rechts) is het risico op longkanker in alle gevallen een factor 25 lager.

[1)] In het epidemiologisch onderzoek waar deze getallen op zijn gebaseerd, is het gewogen gemiddelde genomen van alle mensen die roken of ooit gerookt hebben (Darby, Hill et al. 2004). Voor levenslange rokers is het risico hoger dan hier genoemd, maar voor ex-rokers die op vroege leeftijd zijn gestopt, is het risico lager. Dat geldt zowel voor het basisrisico als voor het extra risico vanwege radon en thoron.

Als we deze resultaten toepassen op de gehele Nederlandse bevolking, dan schatten we in dat blootstelling aan radon- en thorondochters verantwoordelijk is voor circa vierhonderd gevallen van longkanker per jaar. Dat betreft vooral rokers. De onzekerheidsmarge van deze schatting loopt uiteen van honderd tot achthonderd gevallen per jaar. Merk op dat deze berekening gebaseerd is op epidemiologisch onderzoek. Een betere mogelijkheid is er niet, want bij specifieke gevallen van longkanker kunnen we de oorzaak (roken, radon, thoron of een combinatie daarvan) niet bepalen. Jaarlijks krijgen in Nederland bijna twaalfduizend mensen longkanker, voornamelijk als gevolg van (mee)roken (Volksgezondheidenzorg.info 2015).

De vorige schatting over het aantal gevallen van longkanker per jaar in Nederland door blootstelling aan radon is in 2000 uitgebracht door de Gezondheidsraad. Die kwam toen op een waarde tussen honderd en twaalfhonderd, met een beste schatting van achthonderd. Daarbij lopen rokers het meeste risico (Gezondheidsraad 2000). De Gezondheidsraad nam in deze beschouwing de blootstelling aan thoron niet mee, maar ging uit van de toen bekende, maar zoals later bleek te hoge waarde voor de gemiddelde radonconcentratie in Nederlandse woningen van 23 Bq/m^3. Deze waarde was immers gebaseerd op metingen met detectoren die gevoelig waren voor zowel radon als thoron.

De huidige inschatting van het aantal gevallen van longkanker per jaar in Nederland door radon en thoron valt iets lager uit dan de inschatting van de Gezondheidsraad uit 2000, maar als we kijken naar de ruime onzekerheidsmarges, dan zijn de verschillen klein. We hebben nu wel een beter beeld van de bijdrage door radon (ongeveer 70%) en door thoron (ongeveer 30%).

7 Conclusies en aanbevelingen

In dit rapport zijn de resultaten beschreven van een groot landelijk onderzoek naar radon en thoron in Nederlandse woningen. Met dit onderzoek beschikken we voor het eerst over een representatief en betrouwbaar beeld van de jaargemiddelde *radonconcentratie* in Nederlandse woningen vanaf 1930. Tevens heeft dit onderzoek een goed beeld opgeleverd van de jaargemiddelde concentratie van *thoron-dochters* in Nederlandse woningen. Het is wereldwijd de eerste keer dat er systematisch op een landelijke schaal is gekeken naar de thoron-dochterconcentratie in woningen.

7.1 Radon in woningen

De over alle woningen gemiddelde radonconcentratie bedraagt 15,6 Bq/m^3. In de helft van de woningen is de radonconcentratie lager dan 12,2 Bq/m^3, en in 95% is die lager dan 37,9 Bq/m^3. In 10 huizen (0,4%) zijn waarden gevonden tussen 100 en 200 Bq/m^3.

In eengezinswoningen, ook wel grondgebonden woningen genoemd, is de radonconcentratie gemiddeld 5% hoger dan het landelijk gemiddelde. In meergezinswoningen (flats, appartementen en dergelijke) is die 16% lager.

In huizen waar volgens de bewoners wordt gerookt, is de gemiddelde radonconcentratie 12% lager dan in huizen waar niet wordt gerookt. Mogelijk is dit het gevolg van extra ventilatie door bewoners in huizen waar gerookt wordt, maar deze veronderstelling is niet onderzocht. Dit resultaat lijkt gunstig voor rokers, maar dit kleine voordeel valt in het niet bij het feit dat de gezondheidsrisico's van radon voor rokers 25 keer zo hoog zijn als voor nooit-rokers.

We zien een plaatsafhankelijkheid die vooral gerelateerd lijkt aan de bodemsoort ter plaatse: in Noord- en West-Nederland is de gemiddelde waarde lager, en in het rivierengebied en Zuidoost-Nederland hoger dan het landelijk gemiddelde. De hoogste regiogemiddelde waarde, van ongeveer 40 Bq/m^3, treffen we aan in Zuid-Limburg. Maar in vergelijking met veel andere Europese regio's is de radonconcentratie in Nederlandse woningen laag. Daar komt bij dat de radonconcentratie in recent gebouwde woningen (vanaf 2000) gemiddeld 22% lager is dan het gemiddelde van alle woningen sinds 1930. Aan de afspraken die in het verleden zijn gemaakt tussen overheid en bouwwereld om de stralings-belasting in nieuwbouwwoningen niet te laten toenemen, is wat radon betreft dus ruimschoots voldaan.

Volgens recente Europese regelgeving moet de Nederlandse overheid uiterlijk in 2018 een *nationaal referentieniveau voor radonconcentraties in woningen* vastgesteld hebben. Vervolgens moet actie ondernomen worden om radonconcentraties boven het referentieniveau zoveel mogelijk te reduceren. De Europese lidstaten zijn vrij om een nationaal referentieniveau te kiezen, maar het mag niet hoger zijn dan 300 Bq/m^3 (EU 2014). De Wereldgezondheidsorganisatie (WHO 2009) en de

International Commission on Radiological Protection (ICRP 2014) bevelen overheden aan om een nationaal referentieniveau van 100 Bq/m^3 te kiezen. In de landen waar dit redelijkerwijs onhaalbaar is, kan voor een hogere waarde gekozen worden, tot een maximum van 300 Bq/m^3.

In dit onderzoek, dat representatief is voor alle Nederlandse woningen vanaf 1930, hebben we in ongeveer 0,4% procent van de woningen een jaargemiddelde radonconcentratie gevonden die hoger is dan 100 Bq/m^3. Het Nederlandse woningenbestand telt op dit moment ruim zes miljoen woningen met een bouwjaar van 1930 of later. Als we de resultaten van dit onderzoek vertalen naar alle woningen in die groep, dan gaat het in Nederland naar schatting om 25.000 woningen (bouwjaar vanaf 1930) waar de gemiddelde radonconcentratie hoger is dan 100 Bq/m^3. De ANVS heeft aan het RIVM gevraagd om, mede op basis van dit onderzoek, advies uit te brengen over het door Nederland te hanteren *nationaal referentieniveau voor radonconcentraties in woningen.*

7.2 Thoron en thorondochters in woningen

In dit onderzoek is, gemiddeld over iets minder dan 2500 woningen, een jaargemiddelde thorondochterconcentratie bepaald van 0,64 Bq/m^3. In de helft van de woningen vinden we waarden lager dan 0,53 Bq/m^3 en in 95% van de woningen is de thorondochterconcentratie lager dan 1,37 Bq/m^3. Ongeveer 0,5% van de metingen is hoger dan 3 Bq/m^3. De hoogst gevonden waarde bedraagt 13,3 Bq/m^3.

Bij de thorondochterconcentratie zien we geen verschil tussen eengezins- en meergezinswoningen. Ook is de locatie niet van invloed op de thorondochterconcentratie. Wel zien we rond de eeuwwisseling een significante daling: de gemiddelde thorondochterconcentratie in woningen vanaf 2000 is 15% lager dan de gemiddelde waarde over alle woningen sinds 1930.

In huizen waar volgens de bewoners wordt gerookt, is de gemiddelde thorondochterconcentratie 8% lager dan in huizen waar niet wordt gerookt. Net als bij radon past hier de opmerking dat dit gunstige resultaat voor rokers in het niet valt tegen het 25 keer hogere gezondheidsrisico.

Daarnaast zijn er in circa 75 woningen 155 thoronexhalatiemetingen uitgevoerd. Soms in verschillende ruimtes, maar soms ook op meerdere plaatsen op één muur. In de helft van de gevallen was de thoron-exhalatie lager dan 0,022 Bq/(m^{2}s). In ongeveer twee derde van alle exhalatiemetingen vinden we resultaten tot twee keer deze mediane waarde. Maar ongeveer tien procent van de metingen valt veel hoger uit: daar vinden we waarden variërend van tien tot vijftig keer de mediane waarde. We vinden dus, net als in eerdere pilotstudies (Blaauboer 2010, Blaauboer 2012), grote verschillen in de exhalatie van thoron uit in de praktijk toegepaste wandafwerkmaterialen.

In de W75 woningen is ook gekeken naar de concentratie van thorondochters. De verdeling daarvan lijkt veel op de verdeling die we

gevonden hebben in de representatieve groep woningen. In beide groepen hebben we enkele woningen aangetroffen met een iets hogere thorondochterconcentratie, maar dat percentage woningen zijn klein. En ook kleiner dan verwacht op basis van de hiervóór uitgevoerde pilotstudies. We zien dus dat er in nogal wat gevallen sprake is van een hogere thoronexhalatie, maar dat leidt slechts in enkele woningen tot een hogere thorondochterconcentratie. Mogelijk komt dat omdat de op één bepaalde plek op de muur gemeten exhalatiewaarde niet representatief is voor het gehele oppervlak van de ruimte waar de thorondochterconcentratie gemeten is. Maar al bij al is het precieze verband tussen de exhalatie van thoron uit wandafwerkmaterialen en de thorondochterconcentratie in de woning nog niet helder.

Bij dit type metingen is er altijd sprake van een tamelijk ruime onzekerheidsmarge, vooral ten gevolge van telstatistiek, maar bij thoron komt daar een systematische onzekerheid bij, die vooral het gevolg is van de vertaalslag die we moeten maken van de meting van het aantal neergeslagen Po-212 atomen op de detector naar de evenwichts-concentratie van thorondochters in de ruimte. De gegevens voor die vertaalslag zijn bepaald in Japan. Maar in theorie is het mogelijk dat de situatie in Nederland net iets anders is, zodat onze metingen óf een te hoge, óf een te lage inschatting geven van de werkelijkheid. Bij de interpretatie van de thoronresultaten van dit onderzoek moet men met al deze onzekerheden rekening houden.

7.3 Gevolgen voor de gezondheid

Onderzoek naar de relatie tussen blootstelling aan radon of thoron en het optreden van gezondheidseffecten, is lastig. De getallen die het verband leggen tussen blootstelling en de kans op kanker zijn nog onzeker en in de wetenschappelijke wereld is er nog veel discussie over dit onderwerp. Wel staat vast dat de schadelijkheid van straling in de longen voor een belangrijk deel bepaald wordt door rookgedrag: de negatieve gezondheidseffecten van radon- en thorondochters zijn voor rokers veel groter dan voor niet-rokers.

Ondanks alle onzekerheden hebben we een inschatting gemaakt van de kans op het krijgen van longkanker door de bijdrage van blootstelling aan radon- en thorondochters. Voor Nederland schatten we dat 3,5% van alle longkankergevallen komt door blootstelling aan radon en thoron. In een groep van 100.000 rokers gaat het dan om 350 gevallen van longkanker, en in een groep van 100.000 niet-rokers om 14 gevallen. Als mensen langdurig in een situatie verkeren waar de radon- of thorondochterconcentratie verhoogd is, dan is hun radon/thoronrisico, vergeleken met een normale blootstelling, ruwweg twee keer zo groot. Als maat voor 'een verhoogde concentratie' hebben we de waarden uit dit onderzoek gekozen, waarvoor geldt dat 95% van de woningen daaronder zit.

Als we deze resultaten toepassen op de gehele Nederlandse bevolking, dan volgt daaruit dat blootstelling aan radon- en thorondochters verantwoordelijk is voor circa vierhonderd gevallen van longkanker per jaar. Dat betreft vooral rokers. De onzekerheidsmarge van deze schatting loopt uiteen van honderd tot achthonderd gevallen per jaar.

De nieuwe schatting van het aantal gevallen van longkanker per jaar door radon en thoron is iets lager dan de schatting van de Gezondheidsraad uit 2000. Ook hebben we nu een beter beeld van de bijdrage door radon (ongeveer 70%) en door thoron (ongeveer 30%).

7.4 Vervolgonderzoek

In opdracht van de Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming (ANVS) wordt door het RIVM momenteel vervolgonderzoek voorbereid. Het gaat daarbij om de volgende onderwerpen:
1. Het in kaart brengen van regio's en type gebouwen waar, vergeleken met de rest van Nederland, relatief hoge blootstellingen aan radon, thoron en/of gammastraling uit bouwmaterialen kunnen voorkomen.
2. Het reduceren van de onzekerheden in de bepaling van de blootstelling aan thorondochters.
3. Het in kaart brengen van (eigenschappen van) bouw- en wandafwerkmaterialen die mogelijk samenhangen met een verhoging van de blootstelling aan radon, thoron of gammastraling in gebouwen.
4. Het identificeren van bijzondere situaties voor blootstellingen aan radon, thoron en gammastraling uit bouwmaterialen op de werkplek.
5. Het nader bepalen van de stralingsbelasting van leden van de bevolking en van werknemers als gevolg van blootstelling aan radon, thoron en gammastraling uit bouwmaterialen.
6. Onderzoeken welke maatregelen (kosten)effectief zijn om de blootstelling aan radon, thoron en/of gammastraling in gebouwen te verminderen.
7. Het aanleveren van een onderbouwing op grond waarvan de ANVS het 'Nationaal referentieniveau voor radonconcentraties in woningen' en het 'Nationaal Actieplan Radon' kan vaststellen.

In het Nationaal Actieplan Radon wordt het geheel aan informatie, mogelijke maatregelen en adviezen op samenhangende wijze bijeengebracht. Tevens zal binnen dit actieplan een communicatiestrategie uitgewerkt worden om het publieke bewustzijn te vergroten over de gezondheidsrisico's van radon (en thoron), onder meer in combinatie met roken. De informatieverstrekking dient zich niet alleen op burgers te richten, maar ook op besluitvormers, werkgevers en werknemers.

In het Nationaal Actieplan Radon zal uitgebreid aandacht besteed worden aan zinvolle maatregelen. Maar op voorhand is al duidelijk dat, in geval van een relatief hoge radon- of thorondochterconcentratie, extra ventileren een zinvolle en kosteneffectieve maatregel is.

Literatuur

Bader, S., et al. (2010). Stralingsbelasting in Nederlandse nieuwbouwwoningen: Eindrapport ventilatie- en radononderzoek. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, RIVM Rapport 610790009, Bilthoven.

Blaauboer, R. (2010). Meting van ^{220}Rn en consequenties voor eerdere ^{222}Rn surveys. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, RIVM Rapport 610790011, Bilthoven.

Blaauboer, R. (2012). Meetmethoden thoron in survey, VERA-onderzoek. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, RIVM Rapport 610890001, Bilthoven.

Blaauboer, R., et al. (2008). Stralingsbelasting in nieuwbouwwoningen - voorlopige resultaten. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, RIVM Briefrapport 610790004, Bilthoven.

Blaauboer, R. and R. Smetsers (1997). "Outdoor Concentrations of the Equilibrium-Equivalent Decay Products of ^{222}Rn in the Netherlands and the Effect of Meteorological Variables." Radiation Protection Dosimetry **69(1)**: 7-18.

Darby, D., et al. (2004) Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. BMJ DOI: 10.1136/bmj.38308.477650.63

EU (2013). "European Indoor Radon map, December 2011 (versie 11 juni 2013)." From http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/european-indoor-radon-map-december-2011/indoor-radon_3.eps/image_original.

EU (2014). Richtlijn 2013/59/Euratom van de Raad van 5 december 2013 tot vaststelling van de basisnormen voor de bescherming tegen de gevaren verbonden aan de blootstelling aan ioniserende straling, en houdende intrekking van de Richtlijnen 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom en 2003/122/Euratom. Europese Unie, L 13.

Gezondheidsraad (2000). Radon – toetsing rapport 'BEIR VI'. Gezondheidsraad, Publicatie nr 2000/05, Den Haag.

ICRP (1987). Lung cancer risk from indoor exposures to radon daughters. Oxford, Pergamon Press. **17(1)**.

ICRP (2014). Radiological protection against radon exposure. Oxford, Pergamon Press. **43(3)**.

Put, L., et al. (1985). Radonconcentraties in Nederland, Verslag van SAWORA – project A2. Rijksuniversiteit Groningen, rapport KVI-111i, Groningen.

Smetsers, R. and R. Blaauboer (1996). Variations in Outdoor Radiation Levels in The Netherlands. Rijksuniversiteit Groningen, ISBN 90-367-0621-1, Groningen.

Stoop, P., et al. (1998). Results of the second Dutch national survey on radon in dwellings. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, RIVM Report 610058006, Bilthoven.

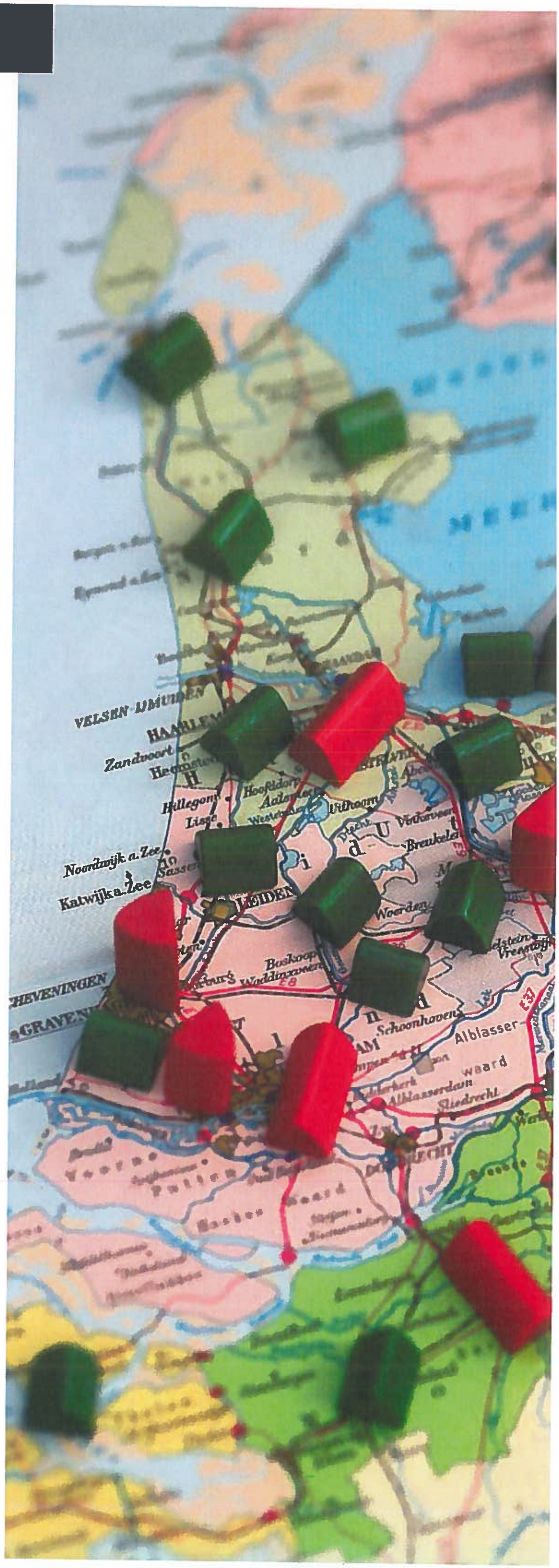
UN (2010). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. United Nations, UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes - Volume I, New York.

Volksgezondheidenzorg.info (2015). "Sterfte aan longkanker in 2012." Zie https://www.volksgezondheidenzorg.info/onderwerp/longkanker/cijfers-context/sterfte-en-overleving#node-sterfte-naar-leeftijd-en-geslacht-0.

WHO (2009). Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective. World Health Organization, UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes - Volume I, Geneva.

Ronald Smetsers | Roelf Blaauboer | Fieke Dekkers |
Martijn van der Schaaf | Harry Slaper

RIVM rapport 2015-0087



Dit is een uitgave van:

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
www.rivm.nl

september 2015

De zorg voor morgen
begint vandaag